

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Ivan Lisičak

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru rada doc.dr.sc Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, kao i dr.sc. Matiji Bušiću na korisnim savjetima i primjedbama koje su oblikovale ovaj rad. Također, velike zahvale osoblju katedre za zavarene konstrukcije na dostupnosti literature te biblioteke koji su bili neophodni za izradu ovog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji na potpori, razumijevanju i strpljivosti tijekom studija.

Ivan Lisičak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 24-02-2016. Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1709-16-64

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVAN LISIČAK**

Mat. br.: **0035184801**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA PROGRAMA VISUAL-WELD 11.0 ZA ODREĐIVANJE OPTIMALNE TEMPERATURE PREDGRIJAVANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF VISUAL-WELD 11.0 SOFTWARE FOR DETERMINATION OF OPTIMAL PREHEAT TEMPERATURE**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu obraditi primjenu numeričkih simulacija koje se koriste pri oblikovanju zavarenih konstrukcija. Navesti nekoliko primjera programskih aplikacija koje su komercijalno dostupne za takvu namjenu te detaljnije opisati njihove mogućnosti. Analizirati zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika kao i glavne probleme koji se javljaju pri izradi zavarenih konstrukcija.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za odgovarajuću debljinu materijala za T- spoj limova od nehrđajućeg čelika odrediti temperaturu predgrijavanja za zavarivanje MAG postupkom koja rezultira minimalnim deformacijama i zaostalim naprezanjima pomoću programske aplikacije Visual-Weld 11.0. Rezultate usporediti s postojećim podacima iz literature i donijeti zaključke o primjenjivosti programske aplikacije Visual Weld 11.0.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc Ivica Garašić

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD	1
2. PRIMJENA NUMERIČKIH SIMULACIJA U ZAVARIVANJU	3
2.1 SIMUFACT	4
2.2 ABAQUS	5
2.3 SYSWELD	6
3. VISOKOLEGIRANI ČELICI	7
3.1 PODJELA VISOKOLEGIRANIH ČELIKA	7
3.1.1 MARTENZITNI ČELICI.....	8
3.1.2 FERITNI ČELICI.....	10
3.1.3 AUSTENITNI ČELICI	12
3.1.4 AUSTENITNO FERITNI (DUPLEX) NEHRĐAJUĆI ČELICI.....	14
3.2 ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	15
3.3 PREDGRIJAVANJE.....	16
3.3.1 ODREĐIVANJE TEMPERATURE PREDGRIJAVANJA	17
4. NUMERIČKA SIMULACIJA	19
4.1 IZRADA MODELA.....	19
4.2 DODAVANJE KOLEKTORA	20

4.3 ODEĐIVANJE PODRUČJA ZUT-A	21
4.4 KREIRANJE 2D POVRŠINE ZA IZMJENU TOPLINE.....	22
4.5 IZRADA KOLEKTORA ZA MEHANIČKO STEZANJE	23
4.6 ODREĐIVANJE PUTANJE IZVORA TOPLINE	24
5. KALIBRACIJA IZVORA TOPLINE	25
1. KORAK.....	26
2. KORAK.....	26
3. KORAK.....	27
4. KORAK.....	28
5. KORAK.....	28
6. UNOS PARAMETARA ZA ZAVRŠNU SIMULACIJU	29
1. KORAK.....	30
2. KORAK.....	30
3. KORAK.....	31
4. KORAK.....	31
5. KORAK.....	32
6. KORAK.....	32
7. I 8. KORAK	32
9. KORAK.....	33
7. REZULTATI I USPOREDBA NUMERIČKE SIMULACIJE.....	34
8. ZAKLJUČAK	39
9. LITERATURA.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1. Simulacijski proces [2].....	2
Slika 2. Prikaz simulacije u programu „Simufact“ [4]	4
Slika 3. Dijagram toka rada Abaqus CAE programa [5].....	5
Slika 4. Prikaz temperaturnog polja i transformacije materijala [6]	6
Slika 5. TTT dijagram za martenzitni čelik 12 Cr 0.15C (AISI 410) [7]	9
Slika 6. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [10].....	11
Slika 7. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [10].....	13
Slika 8. Mikrostruktura austenitno-feritnih (duplex) čelika [10]	14
Slika 9. Utjecaj predgrijavanja na intenzitet hlađenja [19]	16
Slika 10. Model T-spoja	19
Slika 11. Dodavanje kolektora za glavni materijal	20
Slika 12. Dodavanje kolektora za određivanje ZUT-a	21
Slika 13. Stvaranje djela „PART_5“	22
Slika 14. Dodavanje kolektora za izmjenu topline.....	23
Slika 15. Stezanje modela	23
Slika 16. Određivanje trajektorije zavora	24
Slika 17. Putanja izvora topline za zavarivanje.....	25
Slika 18. Prvi i drugi korak kalibracije	26
Slika 19. Treći korak kalibracije	27
Slika 20. Četvrti korak kalibracije.....	28
Slika 21. Peti korak kalibracije	29
Slika 22. Monografski prikaz kalibracije	29
Slika 23. Direktorij spremanja simulacije te odabir vrste modela	30
Slika 24. Odabir vrste materijala.....	31

Slika 25. Određivanje uvjeta hlađenja te vrste stezanja	32
Slika 26. Odabir temperature predgrijavanje te vrste analize	33
Slika 27. Temperatura u ZUT-u, $T_p = 150^{\circ}\text{C}$	34
Slika 28. Raspored naprezanja, $T_p = 100^{\circ}\text{C}$	35
Slika 29. Raspored naprezanja, $T_p = 150^{\circ}\text{C}$	35
Slika 30. Raspored naprezanja, $T_p = 250^{\circ}\text{C}$	36
Slika 31. Prikaz deformacija, $T_p = 100^{\circ}\text{C}$	37
Slika 32. Prikaz deformacija, $T_p = 150^{\circ}\text{C}$	37
Slika 33. Prikaz deformacija, $T_p = 250^{\circ}\text{C}$	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [8] 8

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
η	Korisnost	/
U	Napon	V
I	Jakost struje	A
v_z	Brzina zavarivanja	cm/min
E	Unos topline	kJ/cm
L	Duljina zavora	mm
W	Širina zavora	mm
P	Dubina penetracije	mm
E_f	Korisnost (Visual Weld 11.0)	/
T_p	Temperatura predgrijavanja	°C

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
TIG	Tungsten inert gas
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
ZUT	Zona utjecaja topline
C_{ekv}	Ekvivalent ugljika
AISI	American Iron and Steel Institute
TTT	Time-temperature transformation

SAŽETAK

U ovom radu izvedena je numerička simulacija zavarivanja visokolegiranog nehrđajućeg čelika AISI 316L. U uvodnom, teorijskom djelu dane su osnovne informacije o programima za numeričku simulaciju koji su trenutno konkurentni te se najviše koriste u rješavanjima problema zavarivanja. Također, u teorijskom djelu rada klasificirane su i opisane vrste visokolegiranih nehrđajućih čelika te su navedena njihova svojstva, problemi koji se javljaju kod zavarljivosti navedenih materijala te optimalna temperatura predgrijavanja. Na kraju uvodnog djela dane su smjernice za predgrijavanje visokolegiranih nehrđajućih čelika kod zavarivanja.

U eksperimentalnom djelu rada detaljno je opisana i provedena simulacija zavarivanja visokolegiranog nehrđajućeg austenitnog čelika 316L u programu Visual Weld 11.0. Postupak zavarivanja proveden u numeričkoj simulaciji je MAG. Prilikom unosa ulaznih parametara odabrane su iskustvene veličine te je na temelju njih provedena simulacija. Rezultati simulacije prikazani su u obliku deformacija, temperaturnog područja u zoni utjecaja topline te naprezanja na ispitanom T-spoju.

Ključne riječi: visokolegirani nehrđajući čelik, Visual Weld 11.0, MAG, predgrijavanje

1. UVOD

Simulacija je prikazivanje nekih svojstava ili vladanja fizičkog ili apstraktnog sustava s pomoću vladanja nekog drugog sustava. Navedeno značenje riječi simulacija izvrsna je definicija navedenog pojma u informatičkom smislu [1].

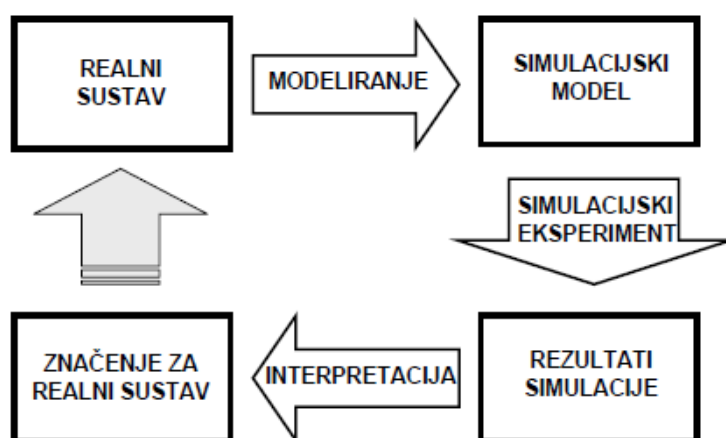
Simulacijsko modeliranje sadrži u sebi proces izradbe modela za koji nema strukturnih pravila. Iskustvo velikog broja ljudi koji su se time bavili dovelo je do nekih općih preporuka za izradu simulacijskih modela koje je formirao G. Gordon 1696. godine [1].

- Granica sustava s okolinom mora biti odabrana tako da sustav, odnosno njegov model, obuhvaća samo fenomene od interesa. Okolina sustava modelira se tako da se ne uključuju detalji i uzročne veze među njima, nego se daje samo njihov sažeti prikaz (npr. slučajna razdioba dolazaka u sustav).
- Modeli ne smiju biti presloženi ili predetaljni, nego treba modelirati samo relevantne elemente sustava. Presložene te predetaljne modele teško je i nemoguće razumjeti, a ponekad čak i vrjednovati. To znači da su njihov razvoj i uporaba teški i neizvjesne kvalitete.
- Model ne smije previše pojednostavniti problem npr. izbacivanjem varijabli nužnih za adekvatni opis sustava.
- Model se mora rastaviti na više dobro definiranih i jednostavnih modula s točno određenom funkcijom koju je lakše provjeriti i izgraditi.
- U razvoju modela preporučuje se primjena neke od provjerenih metoda za razvoj algoritma i programa koje trebaju omogućiti bolje razumijevanje modela i pojedinih njegovih modula u svim fazama razvoja modela.

- Potrebna je provjera logičke i kvantitativne ispravnosti modela, kako pojedinačnih modula, tako i cijelog modela. Kod modela koji uključuju slučajne varijable to znači i primjenu odgovarajućih statističkih tehnika.

Uporaba simulacijskih modela u pravilu zahtjeva rad tima stručnjaka i onih kojima je promatrani sustav predmet zanimanja. Simulacijski model se realizira u obliku kompjutorskog programa koji oponaša ponašanje realnog sustava. Svako izvođenje kompjutorskoga programa može smatrati simulacijskim eksperimentom koji daje rezultate analogne onima koji bi nastupili u stvarnosti u danim uvjetima. Budući da se rezultati odmah obrađuju i dobivaju u sređenom obliku (tablični i grafički prikazi, statistički obrađeni rezultati) moguća je njihova brža i lakša interpretacija nego što je to slučaj pri rezultatima dobivenima eksperimentalno na samom realnom sustavu. Simulacijski modeli u simulacijskom procesu (slika 1) najčešće se primjenjuju radi tri glavna cilja [2]:

- 1.) ISTRAŽIVANJE – provjera hipoteza o ponašanju i strukturi sustava
- 2.) PROJEKTIRANJE – projiciranje ponašanja sustava u kojima nemamo iskustva
- 3.) EDUKACIJA – upoznavanje ponašanja sustava stjecanjem umjetnog iskustva



Slika 1. Simulacijski proces [2]

U svim trima navedenim situacijama polazimo od promatranja i proučavanja realnog sustava, stvaramo njegovu apstraktnu sliku koju realiziramo u obliku kompjutorskoga simulacijskoga programa [2].

2. PRIMJENA NUMERIČKIH SIMULACIJA U ZAVARIVANJU

Proces numeričke simulacije zavarivanja koristi se tijekom pripreme tehnologije zavarivanja za određeni proces te za njegovo optimiranje. Korištenje numeričke simulacije za zavarivanje može smanjiti stvarni broj eksperimenata i prototipova te vrijeme pripreme za određeni proces zavarivanja. Također upotreba numeričkih simulacija može smanjiti investicijske troškove kao i same troškove proizvodnje. Različite mogućnosti mogu biti numerički simulirane te tako stječemo prvi uvid u daljnje ponašanje zavarenog spoja tijekom i nakon zavarivanja. Nakon izvršenja simulacijskog procesa izabire se rezultat koji je najpogodniji. Odabirom ulaznih podataka direktno se utječe na samu simulaciju odabranog procesa te izlazne podatke [3].

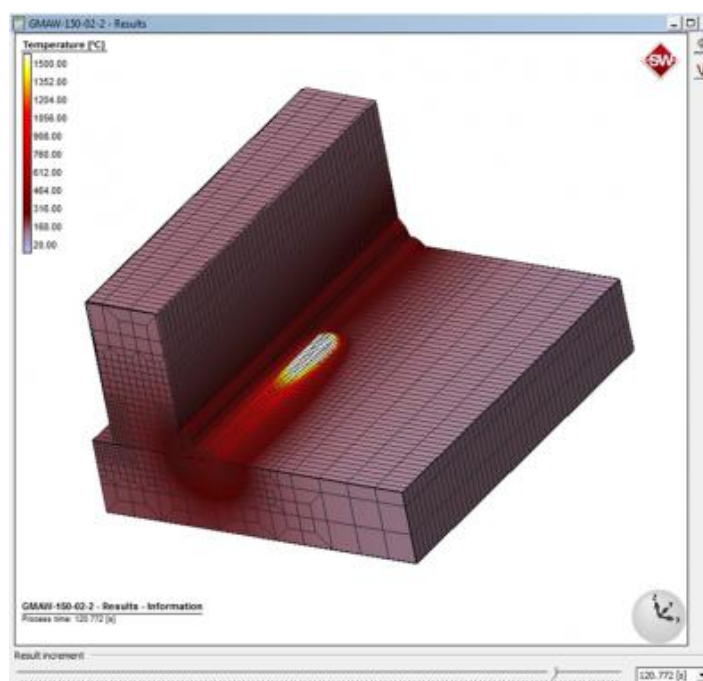
Iskustveno numerička simulacija zavarivanja dijeli se na slijedeća četiri područja [3]:

- I. Usporedba nekoliko različitih tehnologija. Svaka tehnološka alternativa je numerički simulirana te su uspoređeni izlazni parametri (količina depozita, zaostala naprezanja, deformacije itd.).
- II. Procjena vijeka trajanja. Cilj analize je predvidjeti vijek trajanja (zaostala naprezanje, plastična deformacija) cijele konstrukcije ili samo nekog djela uključujući obzir utjecaja postupka zavarivanja. Zaostala naprezanja su numerički simulirana te uzeta u obzir procjene vijeka trajanja.
- III. Predviđanje krhkog loma. Izračunata razina zaostalih naprezanja može biti upotrijebljena tijekom procjene otpornosti na krhki lom.
- IV. Predviđanje deformacija tijekom procesa spajanja zavarivanjem. Ova vrsta predviđanja izvedena je pomoću novog lokalno globalnog pristupa ili planera procesa zavarivanja.

Numeričke simulacije procesa zavarivanja koriste se u energetici, autoindustriji, brodskoj te avionskoj industriji. Razvoj i upotreba programa za numeričku simulaciju eksponencijalno raste, a danas se na tržištu najviše koriste Simufact, Abaqus, Sorpas te Sysweld.

2.1 SIMUFACT

Simufact program za simulaciju zavarivanja omogućuje stručnjaku u području zavarivanja rad bez prethodnog znanja o procesu simulacije kroz vlastito Windows korisničko sučelje. Korisničko sučelje karakterizira precizno strukturno stablo procesa i objekata na dobro strukturiranom zaslonu. Uobičajene funkcije poput „povlačenje i spuštanje“ uz brzo i pouzdano kreiranje modela također imaju korisničko sučelje. Opsežna kontrola vjerodostojnosti, korištenje unaprijed definiranje baze podataka također je dio Simufact programa za simulaciju zavarivanja. Simufact potpuno oslobađa korisnika od dugotrajnog unosa ulaznih parametara koji su potrebni na složenu analizu. Potpuna pozornost pridaje se samom procesu zavarivanja. Slika 2 prikazuje simulaciju u programu Simufact [4].



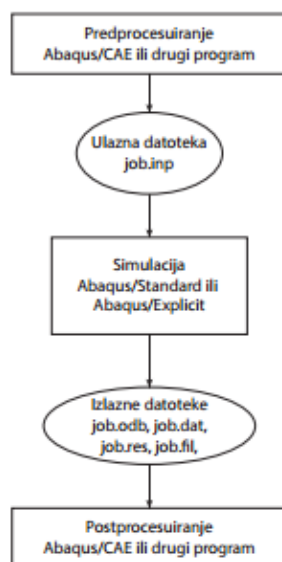
Slika 2. Prikaz simulacije u programu „Simufact“ [4]

Simufact omogućava prikaz [4]:

- deformacija u presjecima za cijelu komponentu ili dio sa različitim vrijednosnim rasponima,
- temperatura,
- zaostalih naprezanja,
- krivulje napretka na određenim mjernim točkama u usporedbi sa pokusnim podacima.

2.2 ABAQUS

Abaqus se temelji na metodi konačnih elemenata te predstavlja skup programa koji se koriste za inženjerske simulacije. Program omogućava rješavanje niza problema od onih najjednostavnijih do najzahtjevnijih nelinearnih situacija. Abaqus sadrži velik broj modela materijala koji simuliraju ponašanje tipičnih inženjerskih materijala, a to su gume, polimeri, kompoziti, te velik broj vrsta metala. Dizajn programa sličan je suvremenim konkurentima na tržištu te ima mogućnost rješavanja problema poput naprezanja, deformacija, pomaka u čvorovima konačnih elemenata, dinamike fluida, te prijenos topline. U zahtjevnijim nelinearnima analizama Abaqus koristi velik broj iteracija jednadžbi u pojedinim točkama konačnih elemenata kako bi simulirao što točnije konačno rješenje. Slika 3 prikazuje dijagram toka rada Abaqus CAE programa [5].



Slika 3. Dijagram toka rada Abaqus CAE programa [5]

Abaqus se sastoji od tri osnovna podsustava:

- Abaqus/Standard
- Abaqus/Explicit
- Abaqus CFD

Također postoje i četiri dodatna sustava specijalne namjene za Abaqus/Standard:

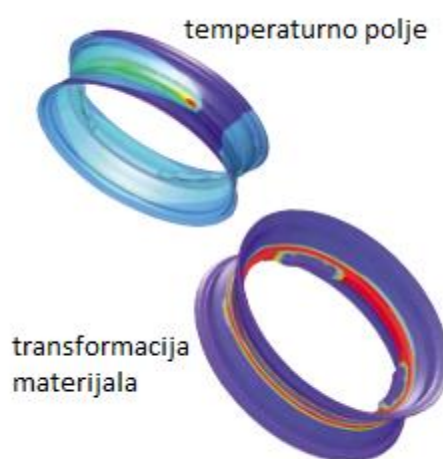
- Abaqus/Aqua
- Abaqus/Design
- Abaqus/AMS

- Abaqus/Foundations Abaqus/CAE je kompletno Abaqus okruženje koje obuhvaća opcije kreiranja Abaqus modela, interaktivno pokretanje i praćenje Abaqus analiza i provjeru rezultata. Abaqus/ Viewer je dio Abaqus/CAE –a koje služi za obradu rezultata nakon analize [5].

2.3 SYSWELD

Sysweld je program za numeričku analizu ESI grupe. U sebi sadrži više vrsta potprograma koji se koriste u određenim granama strojarstva, avioindustrije, autoindustrije te mnogih drugih. U daljnjem eksperimentalnom djelu korišten je potprogram Visual Weld 11.0 u svrhu određivanja optimalne temperature predgrijavanja visokolegiranih nehrđajućih čelika. Program Visual Weld 11.0 zasniva se na pretpostavkama ulaznih podataka koji će se koristiti kao parametri u daljnjoj simulaciji. Također, program nudi široku bazu materijala, postupaka zavarivanja te različite mogućnosti grafičkih prikaza nakon simulacije [6].

Sysweld izvršava simulacije, uzimajući u obzir sve fizičke fenomene koji su uključeni u proces toplinske obrade. Primjer prikaza metalurške transformacije materijala i temperaturnog polja (slika 4) [6].



Slika 4. Prikaz temperaturnog polja i transformacije materijala [6]

Sysweld kao i Abaqus koristi metodu konačnih elemenata za samu izradu modela te pomoću mnogobrojnih iteracija u čvorištima konačnih elemenata iterira postavljene jednačbe u cilju pronalaženja što točnije rješenja [6].

U daljnjem eksperimentalnom djelu rada kao proizvod ulaznih parametara napravljena je simulacija visokolegiranog nehrđajućeg čelika AISI 316L te su na samom modelu prikazane deformacije, raspon temperatura te naprezanja.

3. VISOKOLEGIRANI ČELICI

3.1 PODJELA VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

Početak razvoja i upotreba visokolegiranih čelika krenuo je početkom 20. stoljeća. Prvi ih je patentirao te počeo upotrebljavati u ono vrijeme poznati proizvođač čelika Krupp 1912. godine. Težnja za razvojem takvih kvalitetnih materijala konstantno se razvija sve do danas te se ulažu velika investicijska sredstva radi njihovog usavršavanja. Najveći porast upotrebe visokolegiranih čelika u zadnjih 40 godina događa se zbog uvođenja hladno i toplog valjanja, uvođenje sekundarne metalurgije te upotrebe kontinuiranog lijeva. Proizvodnja visokolegiranih čelika u zadnjih 25 godina se udvostručila, jedino još aluminij pokazuje sličan rast [7][8].

U skupinu visokolegiranih čelika spadaju čelici čiji je sadržaj legirajućih elemenata veći od 5 %.

Visokolegirane čelike dijelimo prema strukturi materijala [9]:

- austenitno - martenzitni čelici,
- martenzitno - feritni čelici,
- martenzitni čelici (meko martenzitni),
- feritni čelici (super – feritni),
- austenitni čelici (super – austenitni),
- austenitno - feritni čelici (duplex).

Razvojem visokolegiranih čelika došlo je do razvoja meko i super martenzitnih čelika kojima se posebnim legiranjem znatno poboljšavaju svojstva. Visokolegirani čelici prema primjeni

dijele se na vatrootporne, korozijski postojane itd. Prema načinu i sustavu legiranja dijele se na krom čelike (najčešće se primjenjuju u praksi), krom-mangan čelike, krom-nikal čelike itd. Svaka skupina zasebno ima određene probleme kod zavarivanja te eksploataciji.

Svojstva čelika prikazana u tablici 1 vrlo su važna kod same zavarljivosti visokolegiranih čelika te direktno utječu na njihovo ponašanje prilikom zavarivanja, a to su modul elastičnosti, toplinska vodljivost, električni otpor te temperaturno rastezanje [7][8].

Tablica 1. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [8]

VRSTA ČELIKA		Fizikalna svojstva				
		$10^{-6} \alpha \times K^{-1}$ (100 °C – 500 °C)	λ W/(m x K) (20 °C)	Ω $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C)	E kN/mm ² (20 °C)	Magne- tičnost
VISOKOLEGIRANI ČELICI	Feritni	10,5 – 12,0	29	0,60	210	+
	martenzitni	10,5 – 12,0	30	0,60	210	+
	austenitni	16 – 18	15	0,73	200	-
	Austenitno-feritni (duplex)	12,5 – 13 (do 300 °C)	14	0,79	206	+

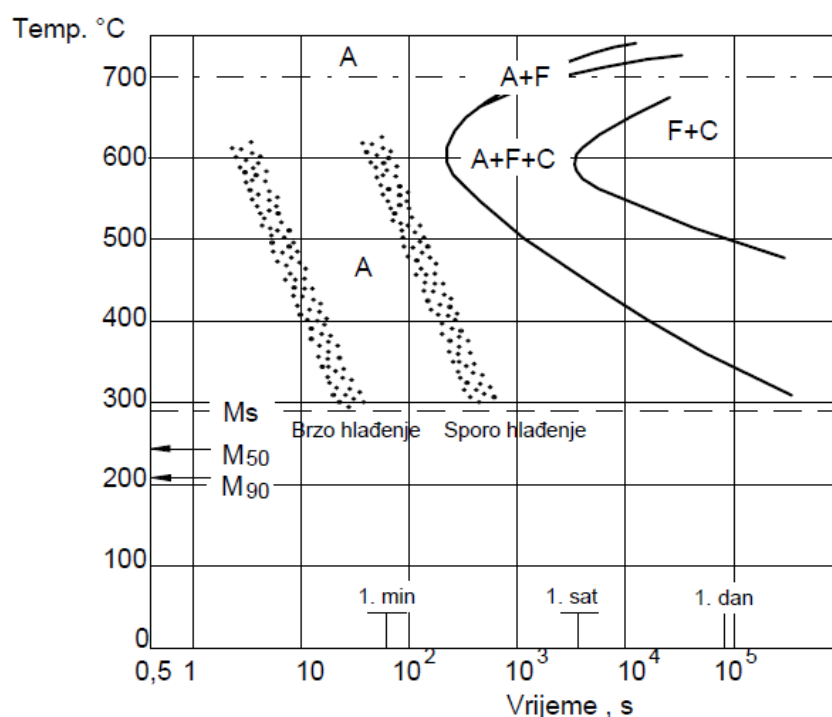
3.1.1 MARTENZITNI ČELICI

Martenzitni Cr - čelici legirani su s 13% do 18% kroma, imaju povišeni udio ugljika (0,2% - 1,0%), mogu sadržavati 2,5% nikla i 1,3% molibdena te po potrebi aluminij i vanadij. Zbog povećanog te najvećeg udjela kemijskog elementa kroma nazivaju se i martenzitni kromni čelici. TTT dijagram martenzitnog čelika prikazan je slikom 5.

Martenzitni čelici se kristaliziraju iz taline u delta ferit te zatim kod hlađenja prelaze u austenit. Prilikom bržeg hlađenja austenit prelazi u martenzit, a kod veoma sporog glađenja dobivamo ferit te sa njime i karbide. Nakon dobivanja martenzitnog čelika poslije hlađenja potrebna je

dodatna toplinska obrada te se u većini slučajeva podvrgava procesu poboljšavanja te se kao takav eksploatira.

Martenzitno-feritni čelici. Ako udio C spustimo ispod 0,1% te povećamo sadržaj kroma između 17 – 18% prilikom zavarivanja dobit ćemo austenitno-feritnu strukturu koja će se tokom hlađenja transformirati u martenzitno-feritnu strukturu. Takva struktura je nepoželjna jer postoji opasnost od izlučivanja martenzita po granicama zrna što potiče krhkost, a smanjuje istezljivost u zavarenom stanju. Problem nastaje kada dolazi i do izlučivanja kromovih karbida u ZUT-u. Nepoželjni karbidi rastvaraju se toplinskom obradom između 750-850°C [7][11].



Slika 5. TTT dijagram za martenzitni čelik 12 Cr 0.15C (AISI 410) [7]

Martenzitne čelike dijelimo u dvije glavne skupine. Prva skupina su konstrukcijski čelici, a u drugu skupinu spadaju alatni čelici [7][11].

Konstrukcijski čelici sadrže do 0,25% ugljika. Prije eksploatacije podvrgavaju se toplinsko temperaturnom procesu poboljšavanja. Kod konstrukcijskih čelika pozornost se usmjerava na antikorozivna svojstva koja dobivamo u meko žarenom stanju.

Alatni čelici sadrže više od 0,3% ugljika. Prije eksploatacije podvrgavaju se popuštanju nakon kaljenja. Najvažnije svojstvo alatnih čelika je otpornost prema abrazijskom trošenju [7][11].

Najčešći postupci zavarivanja martenzitnih čelika:

REL – elektrode s bazičnom oblogom, dobra udarna žilavost.

TIG – postupak prikladan za zavarivanje elemenata malih promjera s preciznim provarom korijena. Unos dodatnog materijala se preporučuje radi smanjenja rizika od stvaranja pukotina.

MIG/MAG – kao zaštitni plinovi koriste se aktivni ili interni plinovi koji sudjeluju u zaštiti zavarenog spoja te u samom kemijskom sastavu nakon zavarivanja.

EPP – postupak zavarivanja koji se koristi kod zavarivanja debljih i većih komada. Zavarivanje se vrši pod posebnim prašcima koji daju željena eksploatacijska svojstva.

Temperatura predgrijavanja martenzitnih čelika iznosi između 200-300°C.

Vrste dodatnog materijala [7]:

1.) Materijali približno istog kemijskog sastava kao osnovni materijal u cilju postizanja željene dinamičke izdržljivosti i čvrstoće te dobivanja martenzitne strukture nakon zavarivanja. Kao posljedica korištenja takvih dodatnih materijala potrebno je provesti naknadnu toplinsku obradu popuštanjem na temperaturama između 700-750°C. Popuštanje se provodi jer nakon zavarivanja dobivamo nepoželjnu strukturu koja se sastoji od delta ferita, martenzita te izrazito nepoželjnog zaostalog austenita.

2.) Austenitni dodatni materijal ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni. Primjenom takvih dodatnih materijala te postavljanjem ispravnih parametara zavarivanja gdje se posebno obraća pažnja na količinu depozita osigurava se povećana žilavost i istezljivost zavara. Posljedica primjene austenitnog dodatnog materijala smanjuje mogućnost pojave zaostalog vodika koji kasnije difundira kroz rešetku materijala zavara te uzrokuje hladne pukotine.

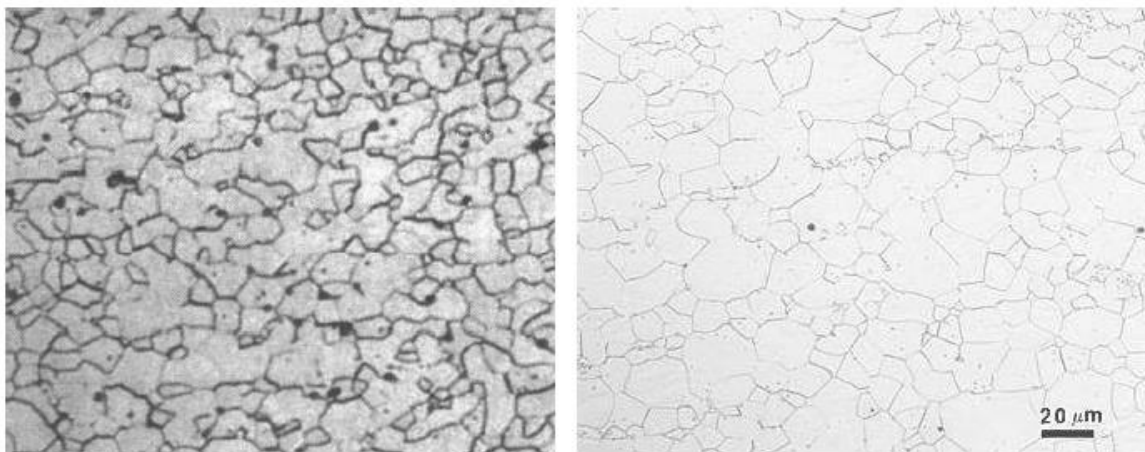
3.1.2 FERITNI ČELICI

Feritni čelici imaju feritnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi te nemaju sposobnost usitnjenja zrna niti fazne transformacije. Sadrže između 16-30% Cr te nizak sadržaj ugljika između 0,05-0,25%. Zbog visokog sadržaja kroma te niskog sadržaja ugljika, ne dolazi do

stvaranja austenita ili se stvara jako mala količina koja prilikom brzog hlađenja prelazi u martenzit. Mali udio martenzita neznatno utječe na čvrstoću ove vrste čelika [13][11].

Feritne čelike odlikuje svojstvo feromagnetičnosti te imaju feritnu mikrostrukturu pri gotovo svim temperaturama te ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu [12].

Takav ferit se naziva δ -ferit (prostorno centrirana kubna rešetka) prikazan slikom 6.



Slika 6. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [10]

Uspoređujući feritne i austenitne čelike feritni imaju veću otpornost na napetosnu koroziju u kloridnim medijima te su cjenovno jeftiniji [13][11].

Ugrijavanjem feritnih čelika iznad 850 °C dolazi do pogrubljenja zrna, a to je najviše izraženo u području ZUT-a što dovodi do interkristalne korozije, gdje se javljaju visoke temperature prilikom zavarivanja. Povećanje zrna odvija se veoma brzo što rezultira lošim mehaničkim vrijednostima [12][13].

Svojstva feritnih nehrđajućih čelika [11][12][14]:

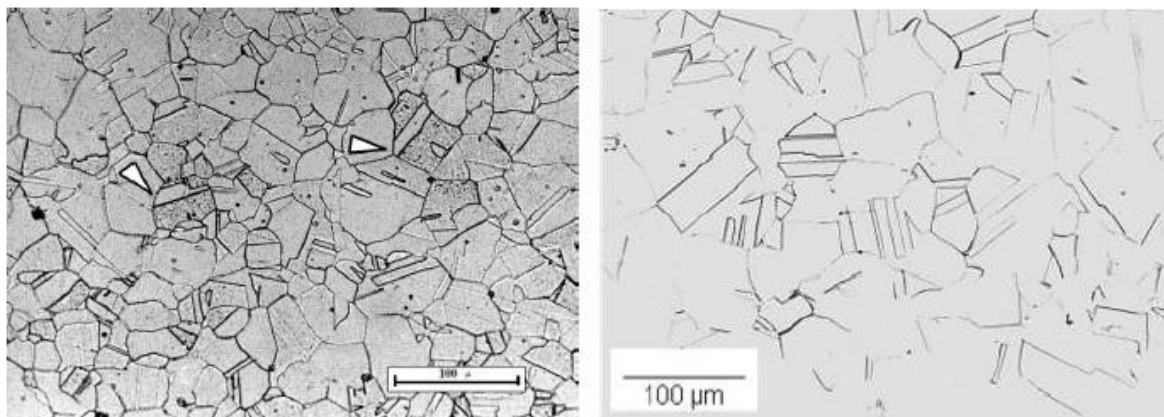
- magnetični
- skloni pojavi "krhkosti 475" pri duljoj izloženosti temperaturi 350 – 520°C
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO_3),
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na rupičastu koroziju,

- loša postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda),
- relativno mekani,
- slaba deformabilnost,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih),
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900°C (ubrzano iznad 1150°C)
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni lomu pri niskim temperaturama.

Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije. Takvi čelici se nazivaju ELA čelici (eng. Extra Low Additions) ili superferitni čelici. Takvi čelici imaju bolja korozijska svojstva, nizak udio ugljika i dušika, dobru žilavost pri niskim temperaturama te bolju zavarljivost [12].

3.1.3 AUSTENITNI ČELICI

Austenitni čelici su najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika zbog izvrsne zavarljivosti, dobre korozijske postojanosti te obradljivosti. Posjeduju visoku duktilnost pri niskim temperaturama. Sadrže 0,002 – 0,15% C, 15 – 20% te 20% Ni. Legiraju se još i sa N, Ta, Ti, Mo, Nb. Dodavanjem Cr više od 18% povećava se otpornost koroziji. Otpornost rupičastoj i napetosnoj koroziji povećava molibden. Slikom 7 prikazana je mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [12][13].



Slika 7. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [10]

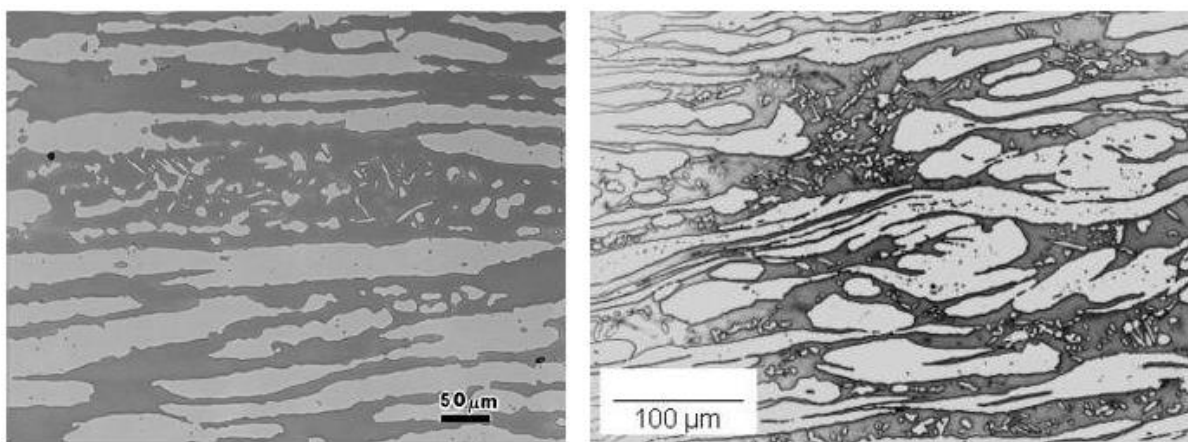
Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika [12][13][14]:

- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- nemagnetični su,
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema
- puzanju pri temperaturama iznad 600 °C,
- izvrsna plastičnost,
- veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- nemogućnost usitnjavanja zrna,
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama (teorijski primjenjivi od -273 °C),
- visok odnos čvrstoća/masa,
- postojana austenitna struktura od "solidus" temperature do ispod sobne temperature,
- nemaju mogućnost zakaljivanja,
- ne povećava im se zrno u ZUT-u tijekom zavarivanja.

Iako se često koriste različitim konstrukcijama, njihovu upotrebu otežava pojava senzibilizacije prilikom postupaka zavarivanja što za direktnu posljedicu ima pojavu interkristalne korozije [12].

3.1.4 AUSTENITNO FERITNI (DUPLEX) NEHRĐAJUĆI ČELICI

Primjena duplex nehrđajućih čelika počinje oko 1930. godine iako tek 1970-ih ulaze u masovnu proizvodnju. Duplex čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu (slika 8) s 40 - 60% ferita. Jedan od ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita, što za direktnu posljedicu ima zadovoljavajući kemijski sastav u ZUT-u. Čvrstoća dupleks čelika veća je od austenitnih čelika [11][13].



Slika 8. Mikrostruktura austenitno-feritnih (duplex) čelika [10]

Svojstva austenitno-feritnih (duplex) nehrđajućih čelika [13, 11]:

- otpornost prema napetosnoj koroziji za razliku od austenitnih čelika, dok postojanost prema interkristalnoj koroziji viša što čelik sadrži više ferita,
- veća čvrstoća u odnosu na austenitni čelik,
- teže se stvaraju karbidi Cr_{23}C_6 (ugljik se otapa u austenitu dok se ferit otapa u feritu),
- primjena je moguća do maksimalno 350°C zbog pojave „krhkosti 475°C “,
- magnetični su,
- žarenjem na $870\text{--}950^\circ\text{C}$ učinkovito se uklanjaju karbidi kroma nastali na granicama ferit/austenit.

Duplex čelike dijelimo u tri glavne skupine. Razlika između prve i druge skupine je ta što druga skupina sadrži veći udio dušika, između 0,1 i 0,25 %. Treću skupinu duplex čelika obilježava $PREN > 40$.

Duplex čelici imaju široku primjenu u području općeg strojarstva te se koriste u industriji nafte i plina, petrokemijskoj industriji, kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji (crpke, grijači, kormila). Najčešće se primjenjuju kao izmjenjivači topline te kao veliki spremnici za transport [11].

3.2 ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

MARTENZITNI ČELICI

Temperatura predgrijavanja martenzitnih čelika je između 200-300°C. Nakon zavarivanja preporuča se popuštanje jer je martenzitni čelik podložan zakaljivanju na zraku. Radi bolje zavarljivosti koriste se čelici s manje od 0,15 %C [15].

AUSTENITNI ČELICI

Odlikuje ih dobra zavarljivost te ih nije nužno predgrijavati pri zavarivanja. Najveći problem austenitnih čelika je mogućnost senzibilizacije tj. izlučivanje precipitata kromovih karbida na temperaturi između 425-850°C te dolazi do interkristalne korozije. Austenitni čelici sklone su deformacijama kao posljedica zavarivanja povišenog koeficijenta toplinske istezljivosti, a sniženog koeficijenta toplinske vodljivosti. Sklone su toplim pukotinama. Problem zavarljivosti rješava se pravilnim odabirom dodatnih materijala te preciznom tehnikom i uvjetima zavarivanja [15].

FERITNI ČELICI

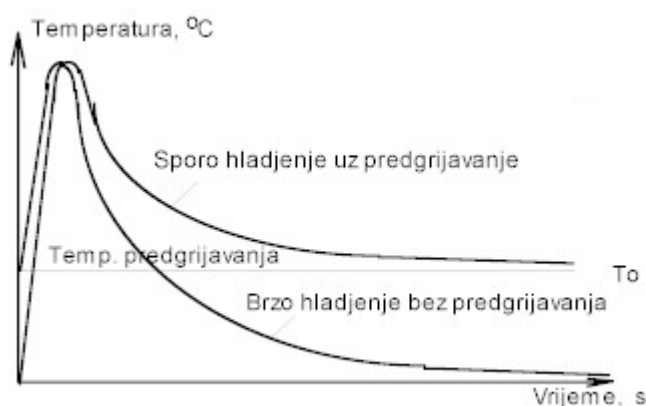
Sklone su pogrubljenju zrna što dovodi do bržeg izlučivanja intermetalnih faza u visokotemperaturnom području pa im je zavarljivost ograničena. Bolja svojstva pokazuju ranije navedeni superferitni čelici koji imaju povišeni udio kroma (19-30%), nizak udio ugljika i dušika te su legirani molibdenom [15].

DUPLEKS ČELICI

Za osiguravanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni „prelegirani“ materijali koji su predviđeni za zavarivanje dupleks čelika. Dodatni „prelegirani“ materijali imaju povećani udio nikla. Zadovoljavajući udio austenitne strukture također se dobiva dodavanjem dušika u zaštitni plin. Zavarivanje se mora provoditi u strogo kontroliranim uvjetima zbog pojave feritizirane strukture koja je najkritičniji dio zavarenog spoja [15].

3. 3 PREDGRIJAVANJE

Predgrijavanjem smanjujemo temperaturnu razliku između neujednačenih temperaturnih područja zavora te intenzitet hlađenja (slika 9). Cilj predgrijavanja je usporiti prebrzo odvođenje topline sa materijala, a izravno time spriječiti neželjeno otvrdnjavanje u području ZUT-a te pojavu zaostalih naprezanja koje mogu dovesti do pucanja materijala. Problem predstavljaju materijali visoke toplinske vodljivosti kao što su aluminij i bakar. Predgrijavanje se može izvoditi lokalno tako da se predgrijava samo mjesto zavarivanja ili cijeli radni komad ako se radi o nekom manjem komadu [16].



Slika 9. Utjecaj predgrijavanja na intenzitet hlađenja [19]

Uvjeti predgrijavanja ovise o vrsti materijala, kemijskom sastavu, načinu odvođenja topline, temperaturi okoline, debljini materijala te o dozvoljenom ukupnom unosu toplinske energije koju ne možemo direktno mjeriti već se određuje iskustveno ili iz formule 1 [17].

$$E = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta \quad (1)$$

Pri čemu su: U – napon [V], I – jakost struje [A], v_z – brzina zavarivanja [mm/s],

η – korisnost, E – energija [J/mm]

Predgrijavanjem do 300 °C omogućuje da temperatura zavarenog spoja duže vrijeme ostane na temperaturama od 550 °C – 650 °C što praktički omogućava izotermičku pretvorbu austenita u ferit i perlit te sprječava pojavu martenzita. Ponekad je za precizno izvedeni zavareni spoj uz predgrijavanje potrebno i naknadno dogrijavanje poslije zavarivanja zbog sprječavanja zakaljivanja te krhkosti kao izravne posljedice [16].

3.3.1 ODREĐIVANJE TEMPERATURE PREDGRIJAVANJA

Najutjecajniji čimbenik za određivanje temperature predgrijavanja je kemijski sastav čelika. Količina legirnih elemenata i ugljika imaju izravan utjecaj na zakaljivost, prokaljivost te mehanička svojstva čelika. Ugljik povisuje zakaljivost, a ostali legirni elementi prokaljivost. Za određivanje kaljivosti čelika koristimo pojam ekvivalent ugljika – C_{ekv} . Računa se pomoću različitih izraza a najčešće koristimo izraz prikazan izrazom 2 :

$$C_{ekv} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (N+Cu)/15 \quad (2)$$

C_{ekv} se koristi za izračune temperatura predgrijavanja kroz razne metode pri čemu se uvrštavaju maseni udjeli elemenata. Najpoznatije su metode Seferian, BWRA, Ito i Bessyo. Navedene metode uz pomoć tablica koriste se za određivanje što točnije temperature predgrijavanja [16].

Primjena predgrijavanja za visokolegirane nehrđajuće čelike [16]:

- Feritni čelici - S visokom sadržajem kroma (15-30%) i niskim sadržajem nikla i molibdena, te s manje od 0,10 % ugljika zavaruju se uz predgrijavanje i međuslojnu temperaturu od 200 - 300°C. Posebna pažnja potrebna za unos topline (<12kJ/cm),
- Austenitni CrNi i CrNiMo čelici - Ne predgrijavaju se kod zavarivanja, ali se pozornost mora obratiti na unos topline (<15kJ/cm),
- Austenitni manganski čelici - Ne predgrijavaju se, gasi se polijevanjem vodom.

Praktične smjernice za predgrijavanje kod zavarivanja [18]:

- Predgrijavanje se ne smije odvijati prebrzo jer može uzrokovati lomove i deformacije dijelova koji se spajaju. Predgrijavanje ne smije biti niti prebrzo radi loše ekonomičnosti.
- Prilikom zavarivanja nužna je kontrola međuslojnih dijelova koja ne smije odstupati od više od +/- 20°C.
- Ukoliko se ne provodi predgrijavanje preporučeno je zagrijavanje radnog komada plamenikom ili nekim drugim izvorom topline sa svrhom uklanjanja površinske vlage.
- Predgrijavanje se može izvesti plamenom, indukcijski ili elektrootporno. Prilikom plinskog zagrijavanja preporučaju se plinovi propan-butan, zemni plin uz stlačeni zrak ili čisti plin. Predgrijavanje kisikom i acetilenom nije preporučeno.
- Obavezno mjerenje temperature izvodi se pomoću termokrede ili termometra te se kontrola vrši i sa suprotne strane mjesta zagrijavanja,
- Lokalno predgrijavanje se provodi u i oko zone pripremljenog spoja. Preporučena širina zone predgrijavanja iznosi otprilike 10 debljina materijala, sa svake strane spoja, ali ne više od 250 mm.

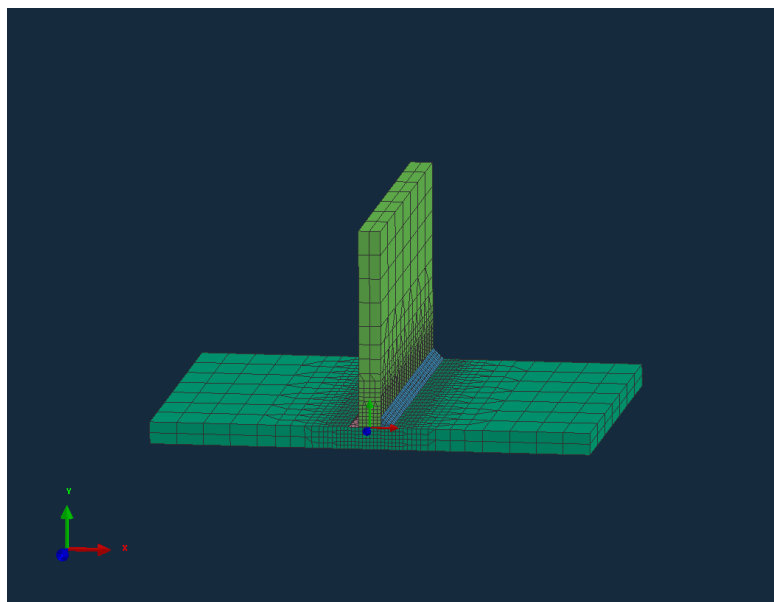
4. NUMERIČKA SIMULACIJA

4.1 IZRADA MODELA

Program za numeričku simulaciju zavarenih konstrukcija korišten kod simulacije zavarivanja T-spoja visokolegiranog nehrđajućeg čelika je Visual Weld 11.0. T-spoj sastoji se od dvije međusobno okomite ploče dimenzija $96 \times 120 \times 6$ te $54 \times 96 \times 6$ obostrano zavarenih kutnim zavarom. T- spoj predstavlja model ranije kreiran u spomenutom programu. Model se u programu prikazuje pomoću mreže izrađene metodom konačnih elemenata. U slučaju kada struktura ima složenu geometriju ili opterećenje te kada su strukture od različitih materijala, nije moguće naći rješenje u analitičkom obliku. Analitičko rješenje podrazumijeva dobivanje analitičkih izraza za računanje traženih karakteristika na različitim mjestima strukture.

Za dobivanje takvih podataka treba rješavati diferencijalne ili parcijalne diferencijalne jednačbe koje se rješavaju samo u slučaju jednostavnih problema. Rješavanje problema metodom konačnih elemenata dobivamo približna rješenja koja se odnose na određene točke strukture. Model se sastoji od konačnih elemenata koji su povezani čvorovima po zajedničkim graničnim linijama ili zajedničkim površinama. Za svaki konačni element postavljaju se jednačbe čijom se kombinacijom dobivaju cijele strukture.

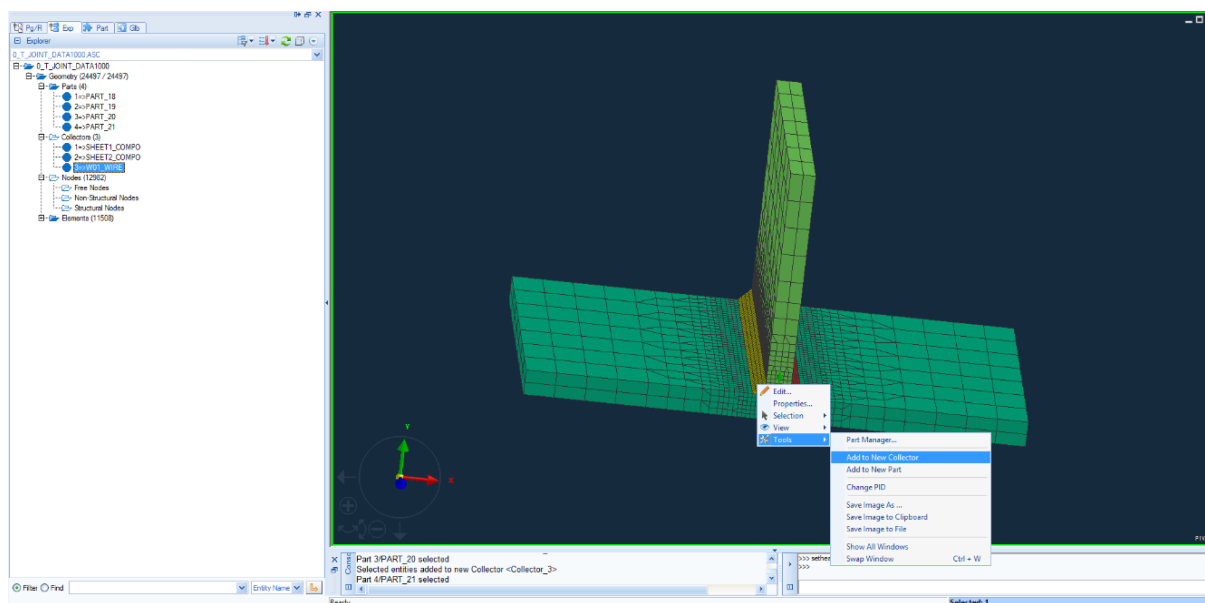
Prvi korak u provođenju simulacije je učitavanje kreiranog modela prikazanog slikom 9.



Slika 10. Model T-spoja

4.2 DODAVANJE KOLEKTORA

Učitani model sastoji se od četiri djela označena sa (PART_18, PART_19, PART_20, PART 21). Nakon učitavanja modela označavamo glavne i dodatne materijale. Glavni materijali su dvije okomite ploče koje označavamo dodavanjem kolektora SHEET1_COMPO i SHEET2_COMPO. Oznaka _COMPO daje programu do znanja da se radi o glavnom materijalu. Dodavanje kolektora koji označava glavni materijal prikazano je slikom 10.



Slika 11. Dodavanje kolektora za glavni materijal

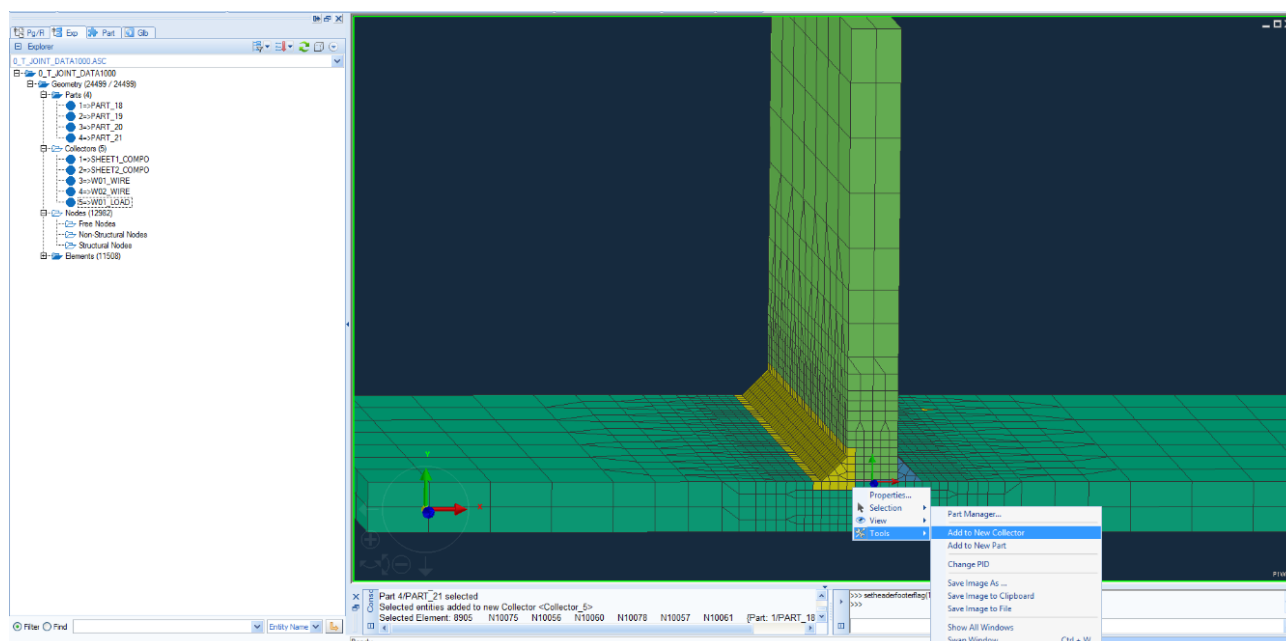
Dodatni materijali su zavari kojima je ostvaren T-spoj te su označeni dodavanjem kolektora W01_WIRE i W02_WIRE. Oznaka _WIRE daje programu do znanja da se radi o dodatnom materijalu.

4.3 ODEĐIVANJE PODRUČJA ZUT-A

Nakon označavanja kolektora glavnog i dodatnog materijala dodajemo kolektor koji određuje zonu utjecaja topline. Na tom području u modelu konačni elementi su najmanjeg volumena jer upravo na tom području želimo dobiti najpreciznije i najtočnije informacije o promjeni volumena, temperature, tvrdoće, sastava te ostalih važnih karakteristika materijala.

Veličina konačnih elemenata udaljenih od zone utjecaja topline su većeg volumena jer na tim dijelovima T-spoja tj. ploča nema tolikih deformacija te promjena temperature i kemijskog sastava.

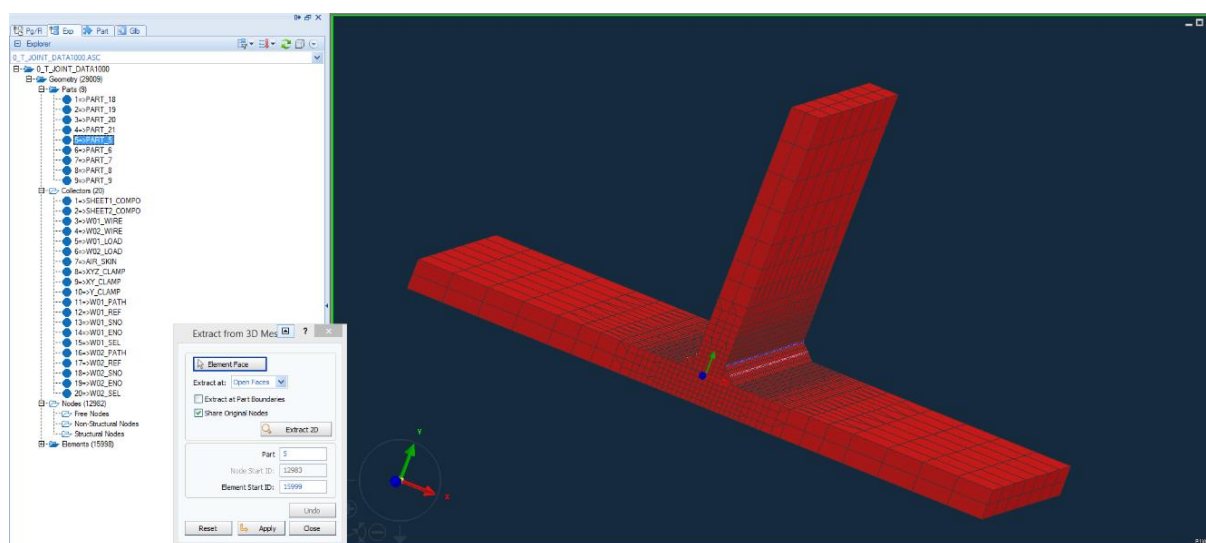
Racionalno dimenzioniranje konačnih elemenata vrlo je važno radi uštede vremena prilikom kasnijeg pokretanja simulacije. Dodajemo kolektore pod nazivom W01_LOAD i W02_LOAD. Oznaka _LOAD označava područje važno za izvor topline jer direktno utječe na kasniji odabir vrste zavarivanja. Slikom 11 prikazano je kreiranje kolektora W01_LOAD.



Slika 12. Dodavanje kolektora za određivanje ZUT-a

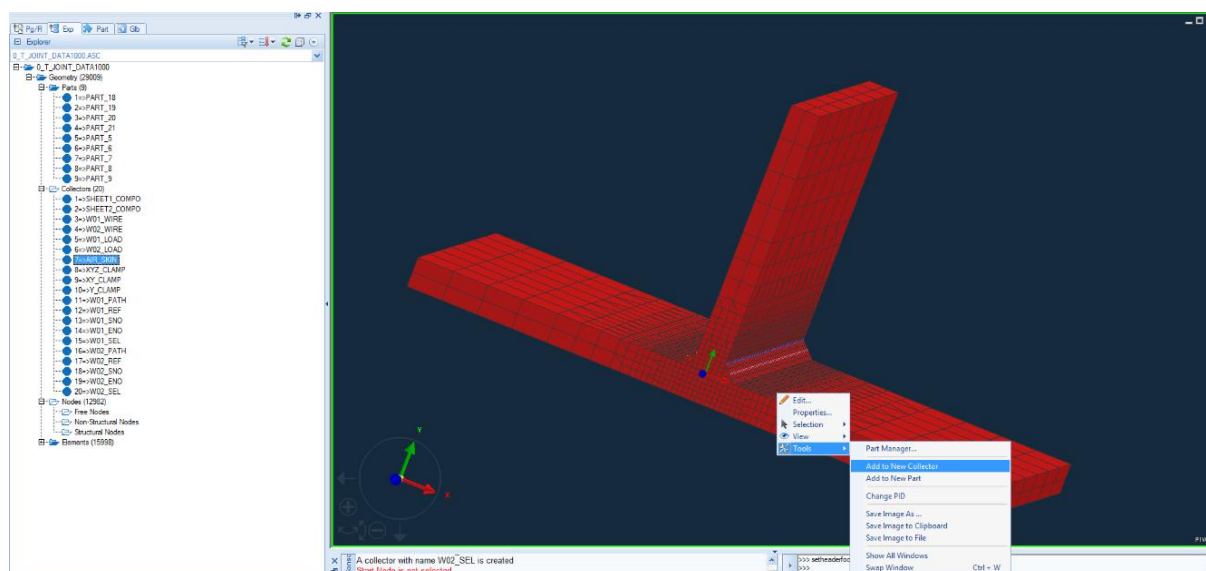
4.4 KREIRANJE 2D POVRŠINE ZA IZMJENU TOPLINE

Nakon dodavanja kolektora za označavanje zone utjecaja topline definiramo novi dio koji se dodaje početnom modelu te ga označavamo „PART_5“. Najprije označimo cijeli 3D model te nakon toga pomoću naredbe „Extract 2D“ određujemo samo površinski sloj 3D modela koji poput filma sudjeluje u izmjeni topline elementa ili okoline. Program pomoću navedene naredbe pretvara 3D model u 2D površinu. Kreiranje 2D površine za izmjenu topline izuzetno je bitno radi kasnijeg određivanja uvjeta hlađenja. Slikom 12 prikazano je određivanje novog djela „PART_5“.



Slika 13. Stvaranje djela „PART_5“

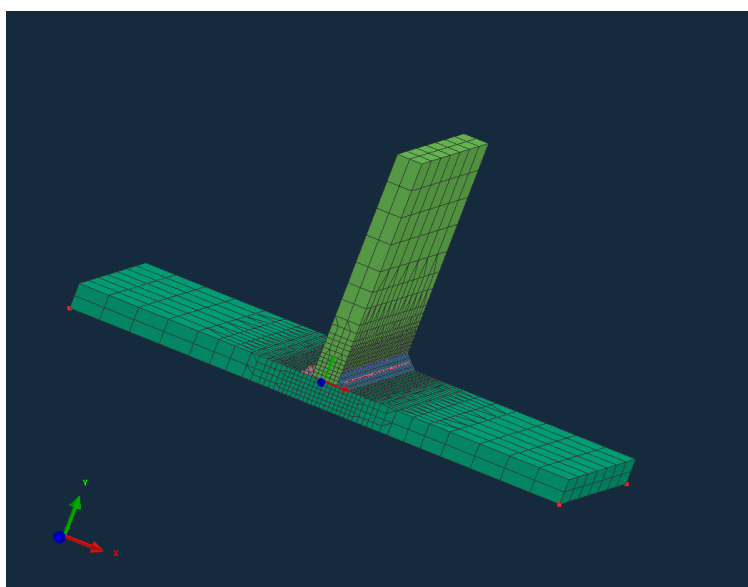
Nakon kreiranja novog djela „PART_5“ određuje se novi kolektor koji prikazuje površinski sloj koji sudjeluje u izmjeni topline. Naziv novog kolektora je AIR_SKIN. Sustav prepoznaje i označavanje pomoću nastavka _HEAT_EXCHANGE koje se češće koristi u označavanju pošto u nazivu odmah inicira o kojoj vrsti kolektora se radi te teže dolazi do slučajne pogreške prilikom imenovanja. Slika 13 prikazuje umetanje novog kolektora pod imenom AIR_HEAT_EXCHANGE.



Slika 14. Dodavanje kolektora za izmjenu topline

4.5 IZRADA KOLEKTORA ZA MEHANIČKO STEZANJE

Nakon umetanja kolektora pod imenom AIR_HEAT_EXCHANGE dodajemo kolektor za mehaničko stezanje elemenata koji se zavaruju. Samo stezanje može se provesti na velik broj načina, što ovisi o mogućnostima i potrebama stezanja te utjecaju na sam element koji se steže. Cilj je stegnuti element tj. model u najmanje tri točke tako da se takvom vrstom stezanja uzrokuje najmanje naprezanje. Stezanje modela prikazano je slikom 14.

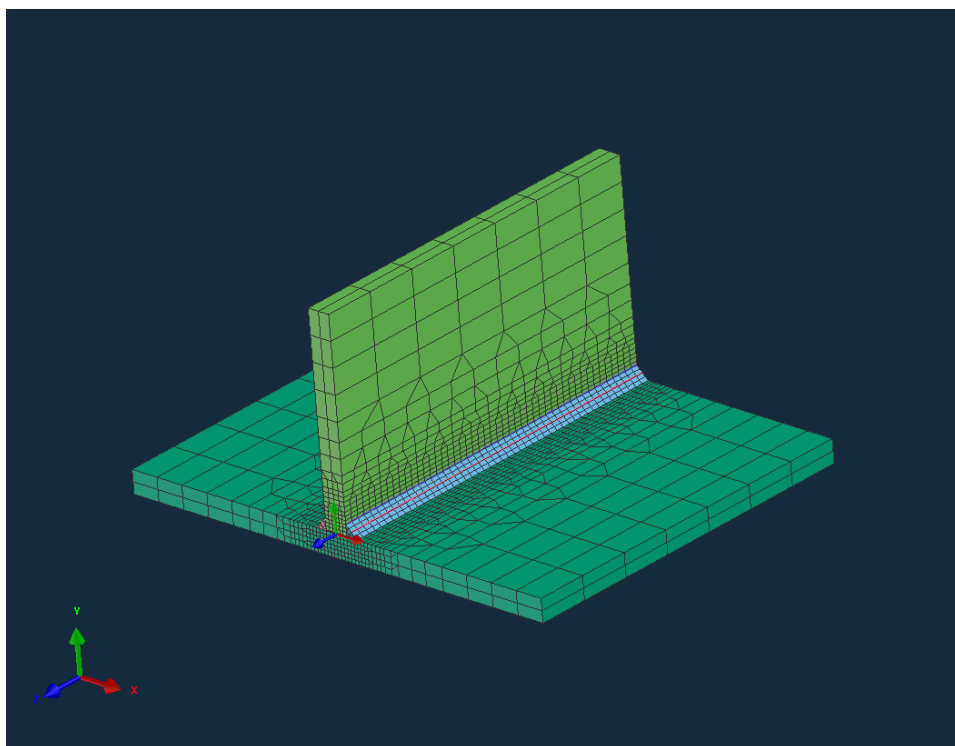


Slika 15. Stezanje modela

Model je stegnut u tri točke u donjim vrhovima ploče. Oznake za točke stezanja su (XYZ_CLAMP, XY_CLAMP I Y_CLAMP). Slova ispred oznake _CLAMP označavaju slobodne osi gibanja u toj točki prilikom stezanja. Pravilno stezanje mode je vrlo bitan te utjecajan faktor u završnoj simulaciji te moram biti pravilno izveden. Prikazani način iskustveno pokazuje najmanji utjecaj na završni simulaciju u pogledu svih parametara.

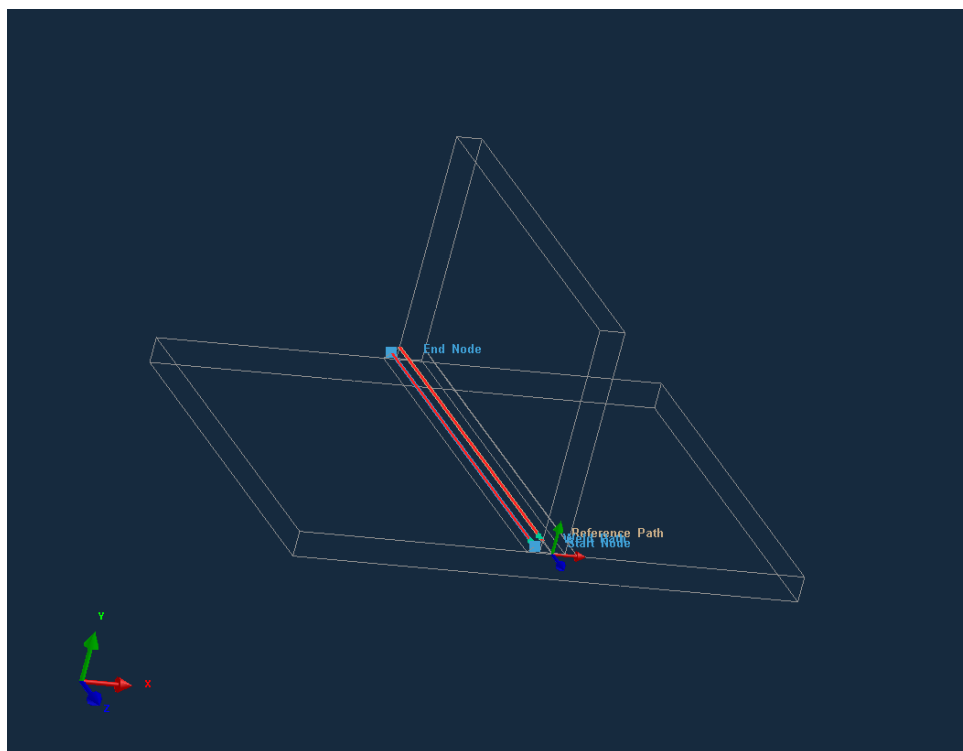
4.6 ODREĐIVANJE PUTANJE IZVORA TOPLINE

Nakon stezanja modela određujemo referentnu liniju, trajektorije, točku početka i kraja zavarivanja. Označavanjem duljine između dvije točke na početku i na kraju zavara označavamo trajektoriju tj. liniju gibanja središta izvora topline. Paralelno s trajektorijom te sa početnom i krajnjom točkom označavamo referentnu liniju gibanja izvora topline koja u poveznici s trajektorijom označava točan početak i kraj gibanja. Slikom 15 prikazano je određivanje trajektorije zavara.



Slika 16. Određivanje trajektorije zavara

Nakon određivanja putanje izvora topline jednog od zavora automatski se pojavilo pet novih kolektora koji označavaju navedeno. Prilikom određivanja izvora topline za drugi zavar rotiramo model te provodimo isti postupak. Nakon toga pojavljuje se ponovno pet novih kolektora koji te ih se sada ukupno dvadeset nalazi na popisu. Slikom 16 prikazana je putanja izvora topline zavora.



Slika 17. Putanja izvora topline za zavarivanje

5. KALIBRACIJA IZVORA TOPLINE

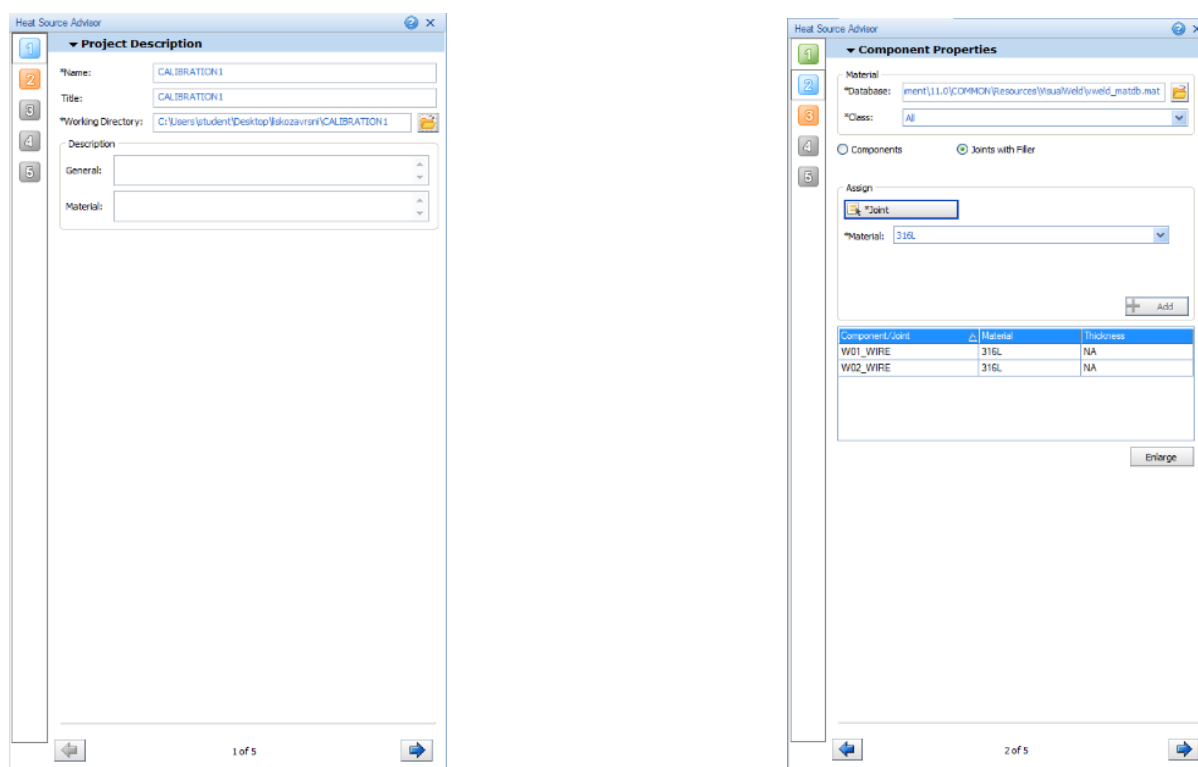
Nakon određivanja putanje izvora topline kalibriramo tj. određujemo parametre i vrstu izvora topline. Kalibracija se provodi u pet koraka.

1. KORAK

U prvom koraku određujemo datoteku u koju će se spremi kalibracija. Ime kalibracije i njena datoteka ne smiju sadržavati dijakritičke znakove niti razmak između pojedinih slova u nazivu. Za svaku novu kalibraciju stvara se nova datoteka.

2. KORAK

U drugom koraku određujemo materijale osnovnog i dodatnog materijala. U oba slučaja odabran je austenitni nehrđajući čelik 316L. Kao dodatni materijal uvijek izabiremo materijal koji je što sličniji osnovnom sa zadovoljavajućim svojstvima te je zato kao dodatni materijal izabran isti čelik AISI 316L. Slikom 18 prikazan je prvi i drugi korak kalibracije.



Slika 18. Prvi i drugi korak kalibracije

3. KORAK

U trećem koraku odabiremo MAG kao vrstu zavarivanja. Unosimo vrlo bitne parametre koji određuju daljnji tijek simulacije. Kao parametri zavarivanja unesene su sljedeće vrijednosti:

Vrsta procesa: MAG

Brzina zavarivanja: $V_z = 25$ m/s

Duljina izvora topline: $L = 6$ mm

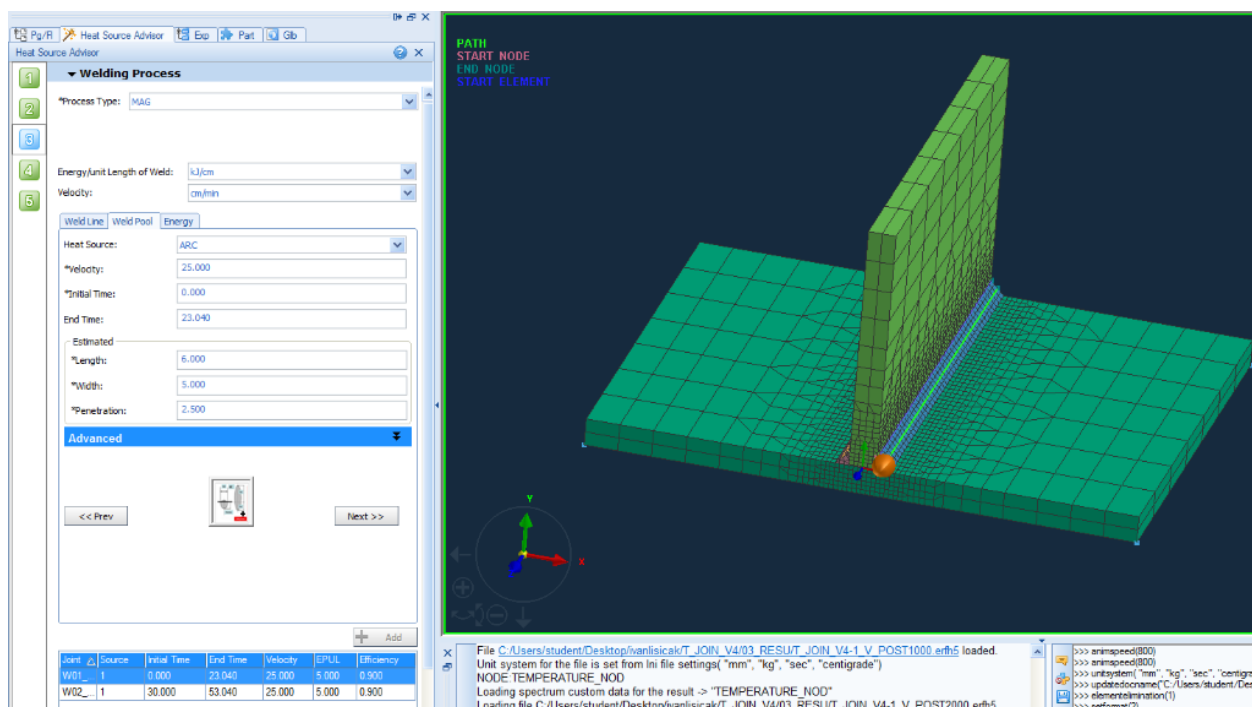
Širina izvora topline: $W = 5$ mm

Dubina penetracije: $P = 4$ mm

Izvor topline: $E = 12$ kJ/cm

Iskoristivost: $E_f = 0.8$

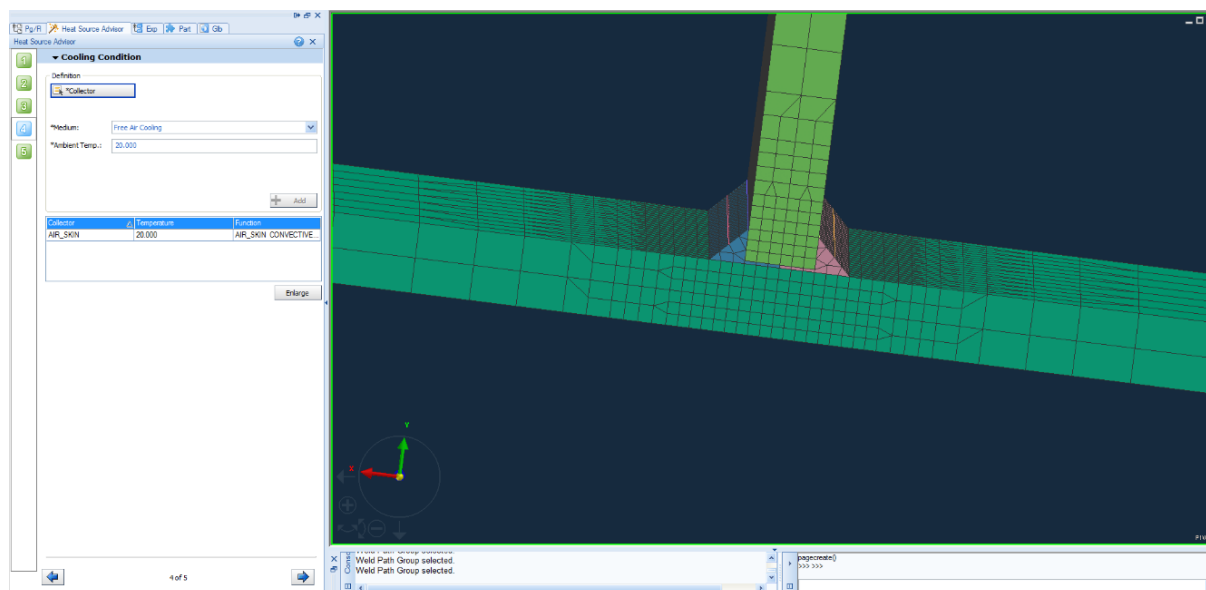
Slikom 19 prikazan je treći korak kalibracije.



Slika 19. Treći korak kalibracije

4. KORAK

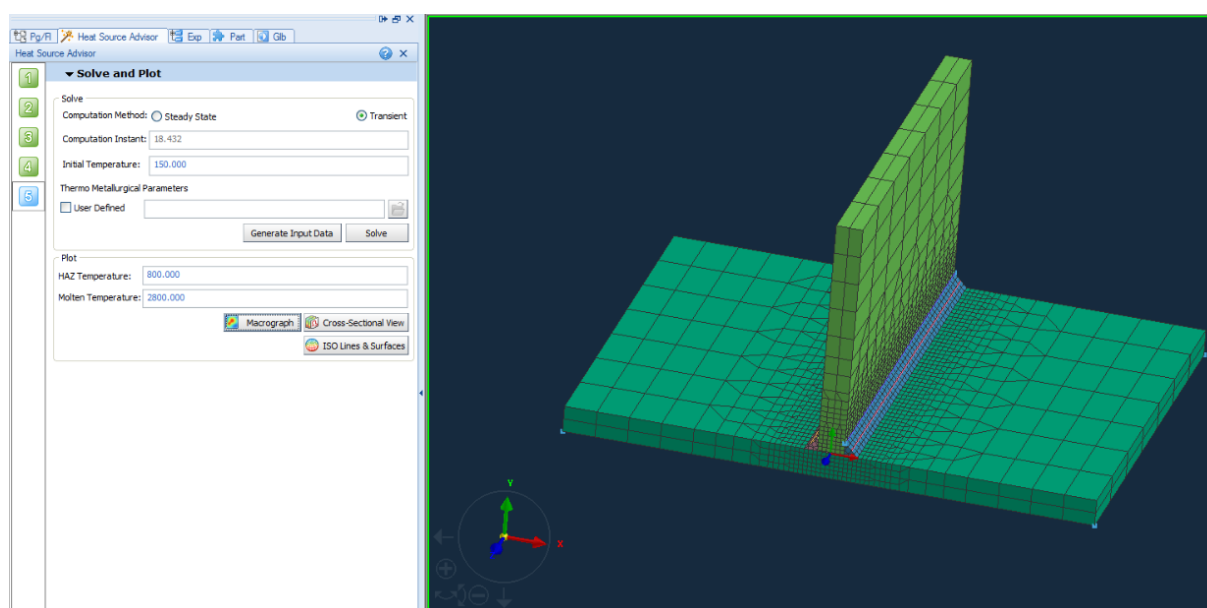
U četvrtom koraku određujemo uvijete hlađenja. Odabiremo 2D ranije kreiranu površinu kao površinu hlađenja modela te kao temperaturu okoline stavljamo 20 C. Slikom 20 prikazan je četvrti korak kalibracije.



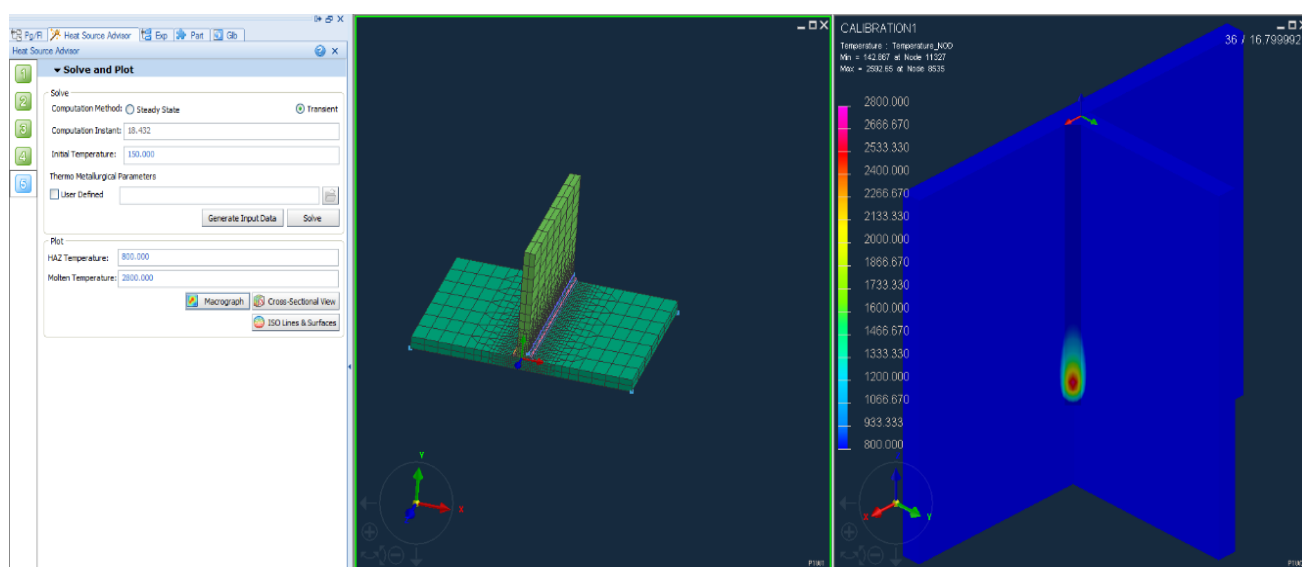
Slika 20. Četvrti korak kalibracije

5. KORAK

U petom koraku određujemo temperaturu predgrijavanja zavarenog spoja. Kao prva temperatura predgrijavanja odabrana je temperatura $T_p = 150$ C. Nakon odabrane temperature predgrijavanja postavljamo temperaturnu skalu zone taljenja kako bi u monografskom prikazu (slika 22) imali što bolji uvid u temperaturno područje koje se proteže kroz zavareni spoj. Slikom 21 prikazan je peti korak kalibracije.



Slika 21. Peti korak kalibracije



Slika 22. Monografski prikaz kalibracije

6. UNOS PARAMETARA ZA ZAVRŠNU SIMULACIJU

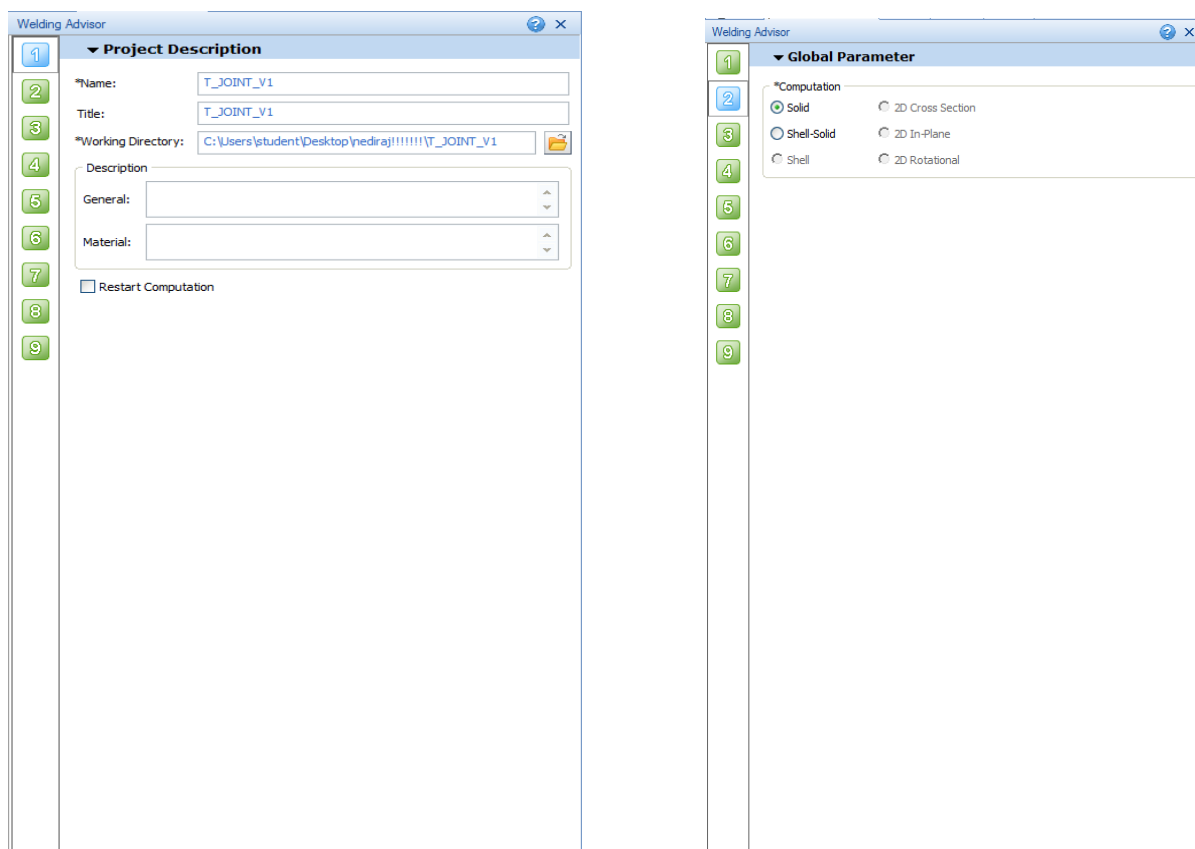
Nakon provedene kalibracije koja služi za određivanje izvora topline gdje su već uneseni kalibracijski parametri slijedi unos parametara koji u kombinaciji sa temperaturom predgrijavanja sudjeluju u kreaciji završne simulacije. Prethodno provedena kalibracija umanje vrijeme izvršavanja završne simulacije te postavlja njene temeljne vrijednosti. Unos vrijednosti za finalnu simulaciju izvodi se u devet koraka.

1. KORAK

U prvom koraku određujemo datoteku u koju će se spremi završna simulacija. Ime kalibracije i njena datoteka ne smiju sadržavati dijakritičke znakove niti razmak između pojedinih slova u nazivu. Za svaku novu simulaciju stvara se nova datoteka.

2. KORAK

U drugom koraku određujemo globalni parametar tj. određujemo da li je naš model cjelokupan 2D u presjeku, 2D u ravnini, 2D kružno simetričan, samo vanjska ljuska ili cjelokupan s vanjskom ljuskom. Naš model je cjelokupan te ga kao takvog odabiremo. Slikom 23 prikazan je prvi i drugi korak unosa parametara za završnu simulaciju.



Slika 23. Direktorij spremanja simulacije te odabir vrste modela

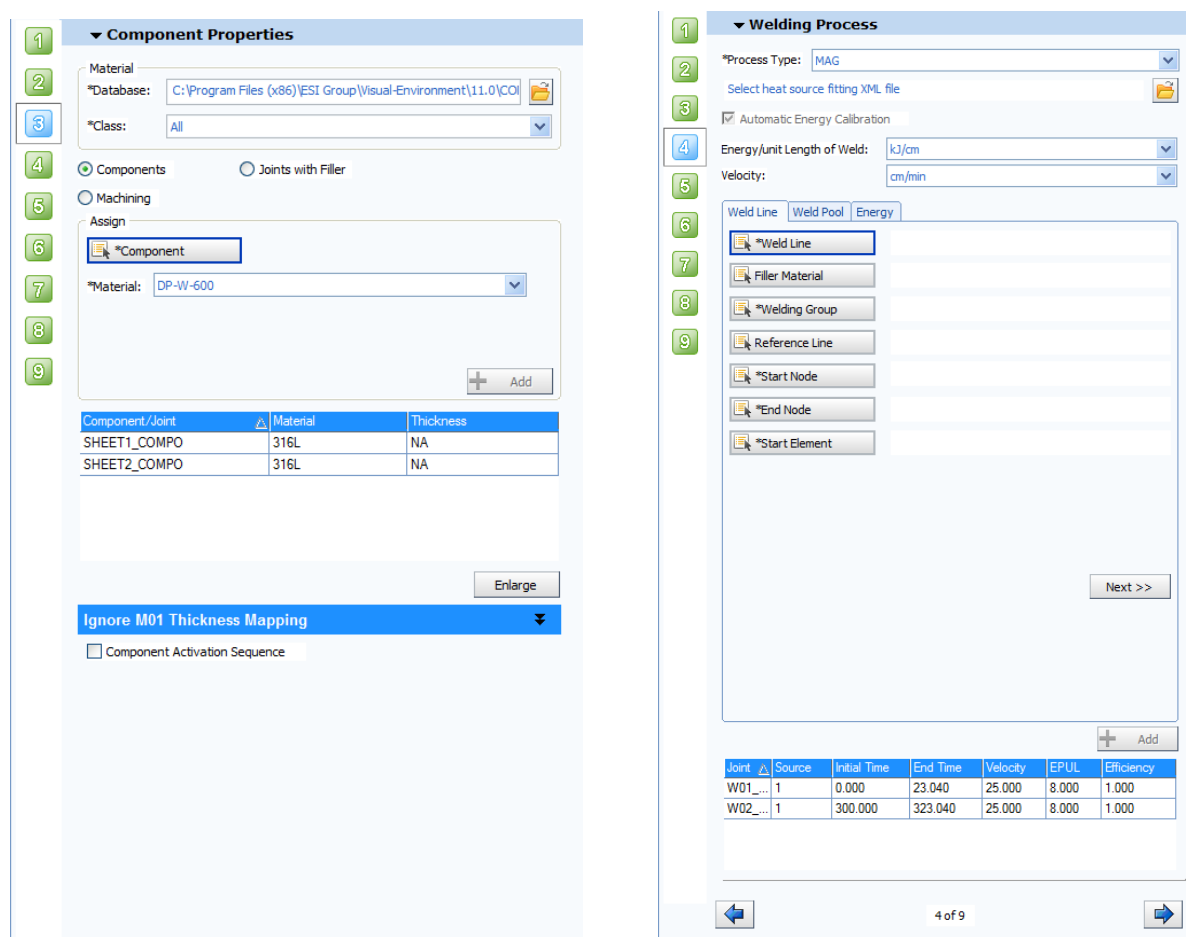
3. KORAK

U trećem koraku određujemo materijale osnovnog i dodatnog materijala. U oba slučaja odabran je austenitni nehrđajući čelik AISI 316L. Kao dodatni materijal uvijek izabiremo materijal koji je što sličniji osnovnom sa zadovoljavajućim svojstvima te je zato kao dodatni materijal izabran isti čelik AISI 316L. Treći korak jednak je drugom koraku kalibracije.

4. KORAK

Četvrti korak jednak je trećem koraku kalibracije te su uneseni parametri potpuno isti. Parametri su ostali isti jer je zadaća ove simulacije vidjeti promjene u izvršnoj simulaciji promjenom temperature predgrijavanja pa nema potrebe mijenjati kalibrirane parametre.

Slikom 24 prikazan je treći i četvrti korak unosa parametara za završnu simulaciju.



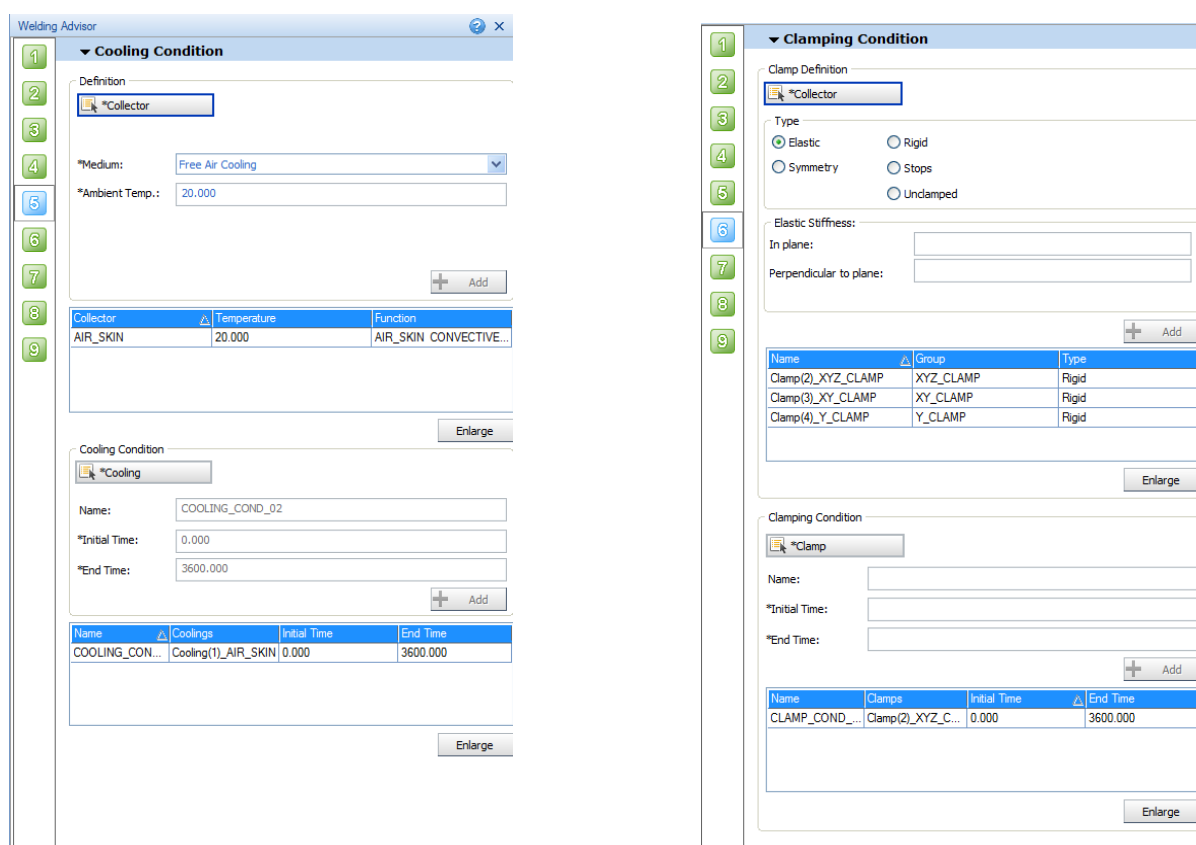
Slika 24. Odabir vrste materijala

5. KORAK

U petom koraku određujemo uvijete hlađenja. Odabiremo 2D ranije kreiranu površinu kao površinu hlađenja modela te kao temperaturu okoline stavljamo 20 C. peti korak jednak je četvrtom koraku kalibracije uz dodatno postavljanje vremena početka i završetka hlađenja .

6. KORAK

U šestom koraku određujemo uvjete stezanja. Stezanje se kako je ranije pokazano vrši u tri točke s ciljem uzrokovanja najmanjih naprezanja. Postavljamo uvjet da su točke stezanja krute iako program nudi još niz različitih mogućnosti. U šestom koraku još se dodaju vremenski početak i kraj stezanja. Slikom 25 prikazani su peti i šesti korak unosa parametara za završnu simulaciju.



Slika 25. Određivanje uvjeta hlađenja te vrste stezanja

7. I 8. KORAK

Navedeni koraci nisu obrađivani jer su postavljeni automatskim postavljanjem prethodnih točaka.

9. KORAK

U devetom, zadnjem koraku, određujemo temperaturu predgrijavanja. Uz temperaturu predgrijavanja određujemo početak i kraj simulacije tj. samo vrijeme izvođenja te vrstu analize.

Vrsta analize određuje želimo li simulaciju za mehanička svojstva, termometalurška ili obje. Odabrane su obje vrste simulacije uz promjenu temperature predgrijavanja. provedene su numeričke simulacije za temperature predgrijavanja 100°C, 150° te 250°C.

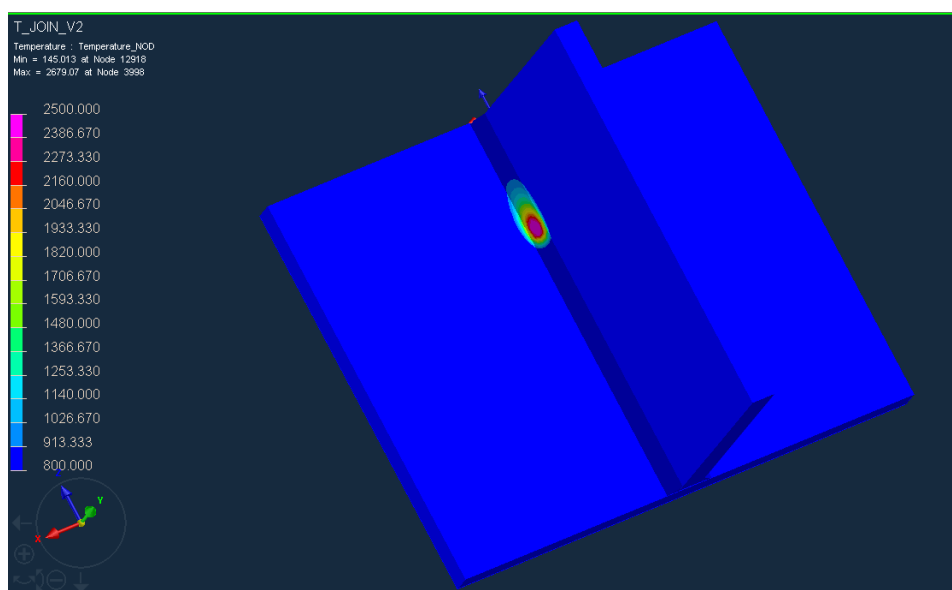
Slikom 26. prikazan je deveti korak unosa parametara za završnu simulaciju.

The screenshot shows the 'Solution Parameter' dialog box. On the left is a vertical sidebar with buttons numbered 1 to 9. The main window has a title bar 'Solution Parameter'. Inside, there are three main sections: 1. '*Analysis' with two checkboxes: 'Thermo-Metallurgical' (checked) and 'Mechanical' (checked). 2. 'Process' with 'Start Time: 0.000' and '*End Time: 3600.000'. 3. '*Initial Temperature: 150.000'. Below these is a blue button labeled 'Advanced' with a downward arrow. At the bottom right are two buttons: 'Generate Input Data' and 'Solve'. The bottom status bar shows '9 of 9' and navigation arrows.

Slika 26. Odabir temperature predgrijavanja te vrste analize

7. REZULTATI I USPOREDBA NUMERIČKE SIMULACIJE

Nakon završnog unosa parametara postavljamo simulaciju. Prva vrsta analize je numerička analiza raspona temperatura u ZUT-u. Nakon simulacija zaključujemo da povećanjem temperature predgrijavanja dobivamo nešto veću temperaturu u ZUT-u. Povećanjem temperature predgrijavanja smanjuje se intenzitet hlađenja te model ne odvodi prebrzo unesenu toplinu. Slikom 27 prikazana je simulacija temperaturnog područja u ZUT-u za temperature predgrijavanja 150°C.



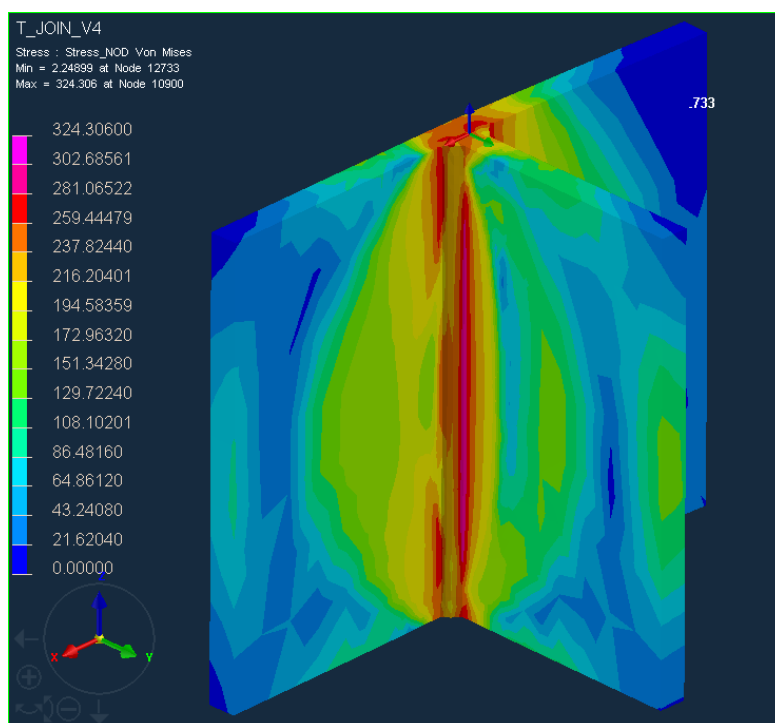
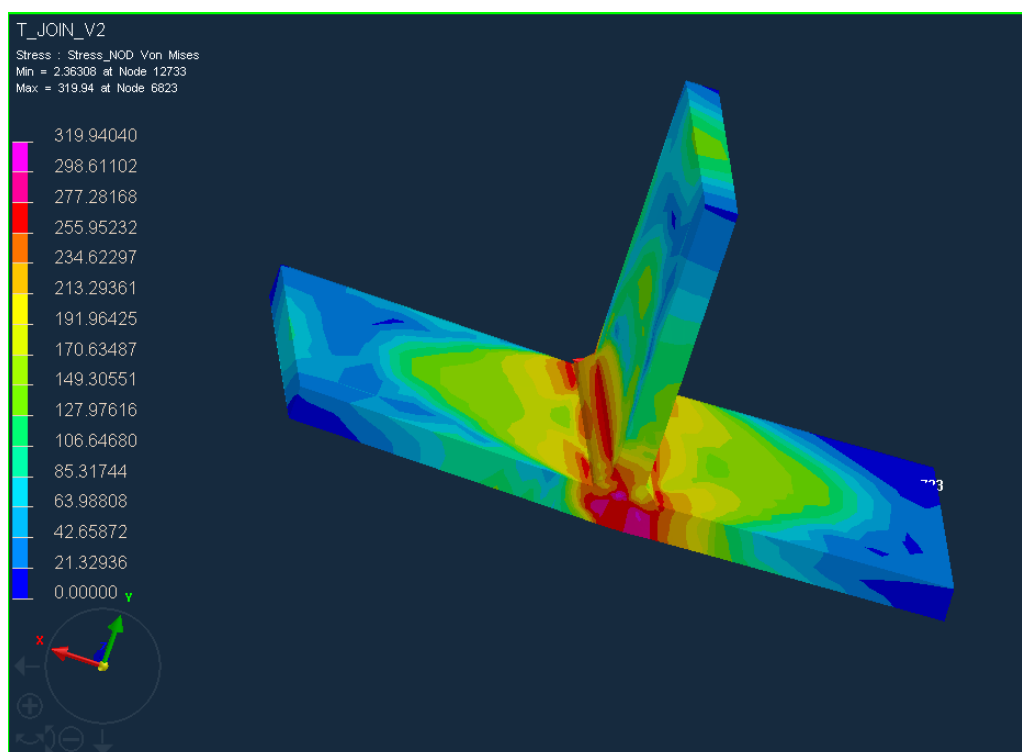
Slika 27. Temperatura u ZUT-u, $T_p = 150^\circ\text{C}$

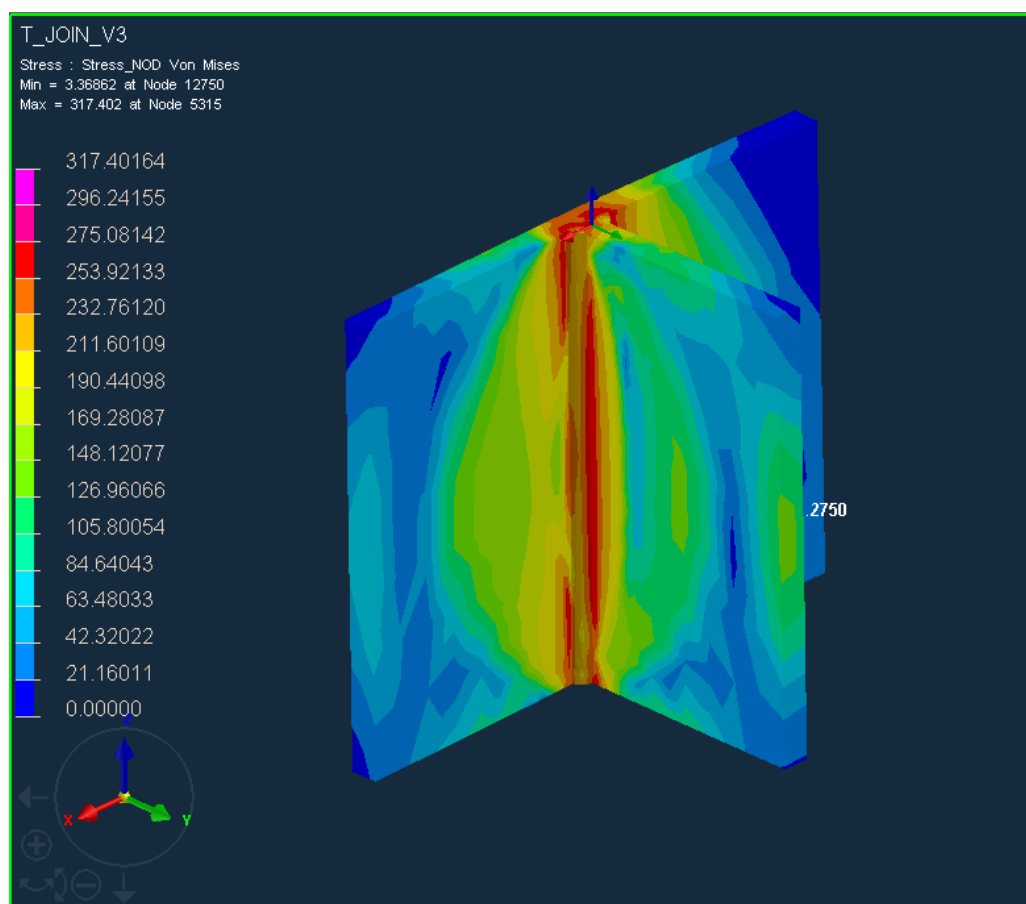
Nakon analize temperature pokrećemo prikaz numeričke simulacije koje prikazuju naprezanja nakon postupka zavarivanja. Uočeno je da se povećanjem temperature pregrijavanja smanjuju zaostala naprezanja u materijalu nakon zavarivanja pošto je sam intenzitet hlađenja sporiji. Najveća naprezanja pojavljuju se u zoni ZUT-a, dok dodatna, ali ne toliko velika naprezanja uzrokuje način stezanja radnog komada. Slikama 30, 31 i 32 prikazana su naprezanja na radnom komadu za temperature predgrijavanja 100°C, 150°C i 250°C. Maksimalne vrijednosti naprezanja su:

$$\sigma_{\max, 100^\circ\text{C}} = 324,3 \text{ N/mm}^2$$

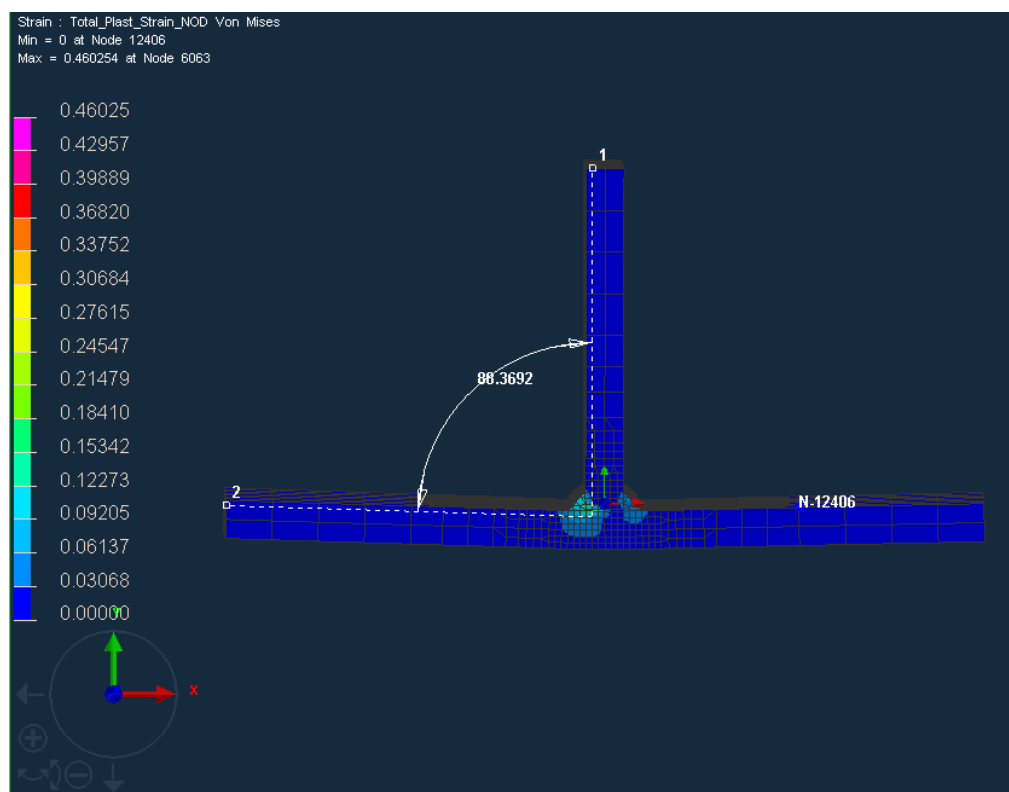
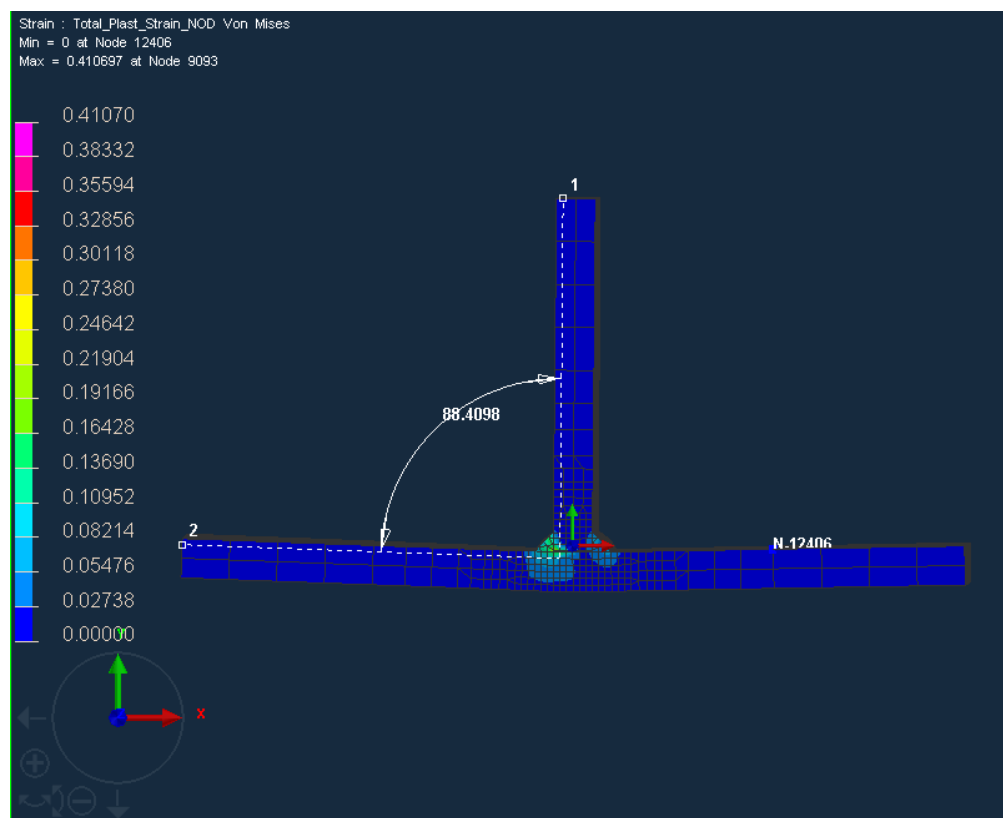
$$\sigma_{\max, 150^\circ\text{C}} = 319,9 \text{ N/mm}^2$$

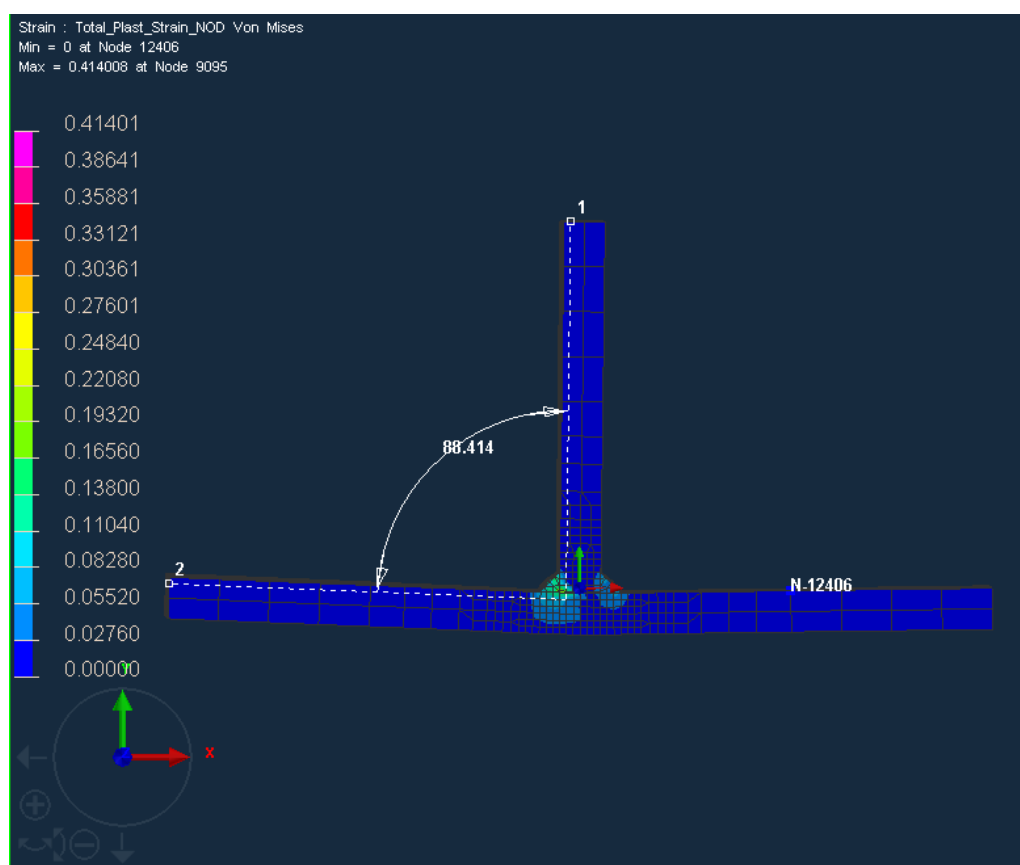
$$\sigma_{\max, 250^\circ\text{C}} = 317,4 \text{ N/mm}^2$$

Slika 28. Raspored naprezanja, $T_p = 100^\circ\text{C}$ Slika 29. Raspored naprezanja, $T_p = 150^\circ\text{C}$

Slika 30. Raspored naprezanja, $T_p = 250^\circ\text{C}$

Zadnja numerička simulacija provodi se radi analize deformacija nakon zavarivanja. Deformacije uzrokuju naprezanja te su te dvije komponente u direktnoj poveznici. Velike deformacije i naprezanja u određenim točkama ili cijelom području ZUT-a mogu prouzročiti pucanje materijala. Nakon provedenih simulacija vidljivo je da se povećanjem temperature predgrijavanja dobivaju manje deformacije materijala nakon zavarivanja što je u krajnjem slučaju i cilj. Slikama 33,34 i 35 prikazana su deformacije na radnom komadu za temperature predgrijavanja 100°C , 150°C i 250°C .

Slika 31. Prikaz deformacija, $T_p=100^\circ\text{C}$ Slika 32. Prikaz deformacija, $T_p=150^\circ\text{C}$

Slika 33. Prikaz deformacija, $T_p=250^{\circ}\text{C}$

8. ZAKLJUČAK

Razvojem različitih programa za numeričku analizu podataka otvara se mogućnost za uštedom pogotovo u grani strojarstva koja se bavi sa zavarenim konstrukcijama. Numerička simulacija pretpostavlja unos parametara prema kojima se kasnije odvija simulacija. Unesenim parametrima program Visual Weld 11.0 omogućava širok spektar prikaza različitih numeričkih analiza deformacija, naprezanja, temperatura, kemijskog sastava itd. Visual Weld 11.0 simulira ono što se događa u samom materijalu komada koji se zavaruje, a ne nikako u električnom luku. Iskustveni podaci iz prakse za navedene analize u navedenom programu mogu se još bolje i detaljnije vidjeti te ukoliko se simulacija provodi prije zavarivanja što je i njen krajnji cilj može spriječiti tj. dati uvid u to da li postoji opasnost od pojave pukotina.

Programi za numeričku analizu podataka imaju velike mogućnosti simuliranja te se njima mora oprezno upravljati. Zavarivanje je posebna tehnologija koja zahtjeva strogo definirane ulazne parametre koji nisu uvijek i u svim uvjetima jednaki. Rad u programu za numeričku analizu Visual Weld 11.0 zahtjeva razumijevanje i stručnost u području zavarivanja jer unos jednog krivog parametra tj. pretpostavke daje besmislene rezultate.

U eksperimentalnom djelu rada prikazano je kako temperatura predgrijavanja utječe na krajnje deformacije, naprezanja te raspored temperatura u ZUT-u. Pomoću generiranih simulacija napravljena usporedba gdje se uviđa koliko je temperatura predgrijavanja bitan faktor u zavarivanju visokolegiranih nehrđajućih čelika. U tri razine predgrijavanja temperaturama 100°C, 150°C te 250°C temperatura u ZUT-u raste povećanjem temperature, dok se naprezanja i deformacije smanjuju kako je prikazano simulacijama.

Zaključno, programi za numeričku analizu podataka danas se dosta koriste, a u budućnosti njihova će primjena eksponencijalno rasti te će postati nezamjenjiv korak u provođenju postupaka zavarivanja.

9. LITERATURA

- [1] Gordon G. System simulation. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1969.
- [2] Law AM, Kelton WD. Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [3] Slováček M. : Numerické simulace svařování, výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí (Numerical simulation of welding process, residual stress and distortion prediction), Ph.Dthesis, September 2005, Univerzity of Defence Brno
- [4] <http://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>, 13.02.2016
- [5] ABAQUS: Analysis user's manual version 6.9 (Dassault Systèmes, 2009).
- [6] http://www.analisisimulacion.com/documentos/productos/pdf/sysweld_ays.pdf, 14.02.2016
- [7] Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 37, Zagreb, 1994., 1/2, str. 3 - 11
- [8] Stawowy, H.: Produkcja nierzędzących čelika – stanje i razvoj u tehnologiji i gospodarenju u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 39, 1996., 3/4, str. 73 - 79
- [9] Schiller, B.; Kekić, M.: Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozijskih postojanih čelika u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 44, 2001., 1/2, 23 - 26
- [10] <http://www.acroni.si/en/?subpageid=3>, 14.02.2016
- [11] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [12] ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, ASM International, 1994.
- [13] Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih čelika - zbornik radova
- [14] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod 1998.; str. 12-9.
- [15] JURAGA, I., ŠIMUNOVIC, V., ŠPANICEK, D.: Contribution to the study of effects of surface state of welded joints in stainless steels upon resistance towards pitting corrosion, Metalurgija, vol 46, br. 3, Hrvatsko metalurško društvo, Zagreb, 2007., 185-189.
- [16] Šisl, V.; Kovačević, B.; Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio), Zavarivanje 44 (1/2), str. 7.-15.; 2001.
- [17] S. Kralj, Š. Andrić, K. Tomašević, Primjena računala u zavarivanju, zavarivanje 34 (1991) 3-4, 109-117

[18] Juraga, I.; Živčić, M.; Gracin, N.; Reparturno zavarivanje; Vlastita naknada, Zagreb, 1994.

[19] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/predg.html>, 14.02.2016